

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra výrobních strojů a konstruování**

Aplikace metod technické diagnostiky na horizontální  
čerpadla

Application of technical diagnostics on the horizontal  
pumps

Student:

Bc. Miroslav Botík

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2013

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Botík**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství  
Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování  
Téma: Aplikace metod technické diagnostiky na horizontální čerpadla  
Application of Technical Diagnostics on the Horizontal Pumps

Zásady pro vypracování:

Vibrační diagnostika je jednou z nejvýznamnějších metod pro určování technického stavu strojních zařízení. Využijte proto vhodné nástroje této metody a také dostupného zařízení pro určování technického stavu horizontálních čerpadel. V rámci diplomové práce se zabývejte problematikou identifikace vznikající závady, možnostmi použití jiných metod s důrazem na vibrodiagnostiku. Změřená data analyzujte a proveďte následná vyhodnocení.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte potřebná měření.
5. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Další podrobnější informace provede vedoucí práce a firma OKK Koksovny, a.s.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. 159 s. ISBN 80-03-00308-3.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. ČVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80.01-02417-2

*Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.*

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....18.5.2013.....



podpis studenta



Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě: 18.5 2013 .....

Bc. Miroslav Botík

Rusava 75

768 41

Miroslav Botík .....

Podpis

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. BOTÍK, M. *Aplikace metod technické diagnostiky na horizontální čerpadla: Diplomová práce*. Ostrava: katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013, 104s. vedoucí práce Blata, J

Diplomová práce se zabývá diagnostikou horizontálních čerpadel ve společnosti koksovna Svoboda v Ostravě Přívoze. V teoretické části práce jsou charakterizovány jednotlivé druhy čerpadel, jenž se využívají k dopravě kapalin, dále je vysvětlena problematika těchto čerpadel. V úvodní teoretické části jsou také popsány vibrodiagnostické a termodiagnostické metody technické diagnostiky, které lze využít při diagnostice horizontálních čerpadel a objasněny některé příčiny vzniku vibrací u těchto strojů. V praktické části práce jsou popsána diagnostikovaná čerpací soustrojí a vyhodnoceny naměřené hodnoty vibrací a teplotní pole strojů.

## ANNOTATION OF THESIS

Bc. BOTÍK, M. *Application of technical diagnostics on the horizontal pumps: Master's Thesis*. Ostrava : Department of Production Machines and Design, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2013, 104p. Thesis Head: Blata, J

This thesis deals with the diagnosis of horizontal pumps at Svoboda company in Ostrava Přívoz. In the theoretical part are characterized types of pumps, which are used to transport liquids and explained the issue of the pumps. The introductory section describes the theoretical and vibrodiagnostic thermodiagnosics methods of technical diagnostic which might be used in the diagnosis of horizontal pumps and clarified some of the causes of vibration in these machines. In the practical part of the thesis are diagnosed pumping sets and evaluated the measured vibration and temperature field machinery.

Klíčová slova: vibrace, čerpadla, porucha, soustrojí, frekvence, ložisko

Keywords: vibration, pumps, malfunction, aggregate, frequency, bearing

# OBSAH

1 Úvod do problematiky čerpadel .....	10
1.1 Rozdělení čerpadel.....	10
1.2 Hlavní parametry čerpadel.....	13
1.3 Hydrostatická čerpadla .....	14
1.3.1 Pistová čerpadla.....	15
1.3.2 Čerpadla s rotujícími písty.....	16
1.3.3 Rotační čerpadla komorová.....	17
1.4 Hydrodynamická čerpadla .....	18
1.4.1 Odstředivá čerpadla .....	19
1.4.2 Axiální čerpadla .....	26
1.5 Ložiska.....	27
1.5.1 Valivá ložiska.....	27
1.6 Termodiagnostika .....	31
1.6.1 Teploměry pro kontaktní měření teploty.....	32
1.6.2 Bezdotykové měření teploty .....	35
1.6.3 Termografie.....	37
1.7 Vibrodiagnostika.....	44
1.7.1 Snímače vibrací .....	44
1.7.2 Základní metody vibrodiagnostiky.....	48
1.7.3 Diagnostika valivých ložisek.....	49
1.7.4 Diagnostika čerpadel .....	53
1.7.5 Diagnostika elektromotorů .....	55
2 Charakteristika společnosti koksovna Svoboda.....	57
3 Aplikace metod technické diagnostiky v praxi .....	59
3.1 Popis použitých měřicích zařízení .....	59
3.2 Schéma diagnostikovaného čerpacího soustrojí .....	61
3.3 Popis diagnostikovaného čerpacího soustrojí.....	61

3.4	Volba umístění měřících míst na čerpacím zařízení .....	62
3.5	Diagnostika venkovních čerpadel .....	64
3.5.1	Měření mohutnosti vibrací venkovních čerpacích soustrojí.....	65
3.5.2	Vyhodnocení frekvenčních spekter rychlosti vibrací venkovních čerpacích soustrojí .....	71
3.6	Diagnostika horizontálních čerpadel umístěných v hale .....	80
3.7	Celkové zhodnocení technického stavu všech čerpacích soustrojí.....	95
Závěr.....		99
Seznam použitých zdrojů .....		101

## Seznam použitých zkratek a symbolů

$B_d$	Průměr valivého segmentu [mm]
BPI	Frekvence rázů vnějšího kroužku ložiska [Hz]
BPFO	Frekvence rázů vnitřního kroužku ložiska [Hz]
BSF	Frekvence rázů valivých segmentů [Hz]
č.	Číslo
ČSN	Česká technická norma
el.	Elektro
f	Frekvence [Hz]
$f_n$	otáčková frekvence [Hz]
$f_m$	Frekvence míjení [Hz]
FFT	Fast Fourier Transformation (rychlá Fourierova transformace)
H	Dopravní výška [m]
HF	High frequency emission (metoda vysokofrekvenčního vyzařování)
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní norma)
min. <sup>-1</sup>	Otáčky za minutu
např.	Například
$n_k$	Kritické otáčky
Obr.	Obrázek
P	Výkon [kW]
p	Tlak [MPa]
Q	Průtok [ $l \cdot min^{-1}$ ],
RMS	Root Mean Square (efektivní hodnota)
Re	Reynoldsovo kritérium
$t$	Teplota [°C]
T	Termodynamická teplota [K]
Tab.	Tabulka
tn.	To znamená
tzv.	Tak zvaný
$v$	Rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$Z_k$	Počet lopatek oběžného kola
$Z_{hk}$	Počet lopatek rozváděcího kola
$\alpha$	Teplotní součinitel odporu [ $K^{-1}$ ]
$\varepsilon$	Emisivita [1]

$\eta$	Účinnost [1]
$\eta_{min}$	Účinnost minimální [1]
$\eta_{opt}$	Účinnost optimální [1]
$\nu$	Kinematická viskozita [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
1X	První otáčková frekvence [Hz]
2X	Druhá otáčková frekvence [Hz]

# 1 Úvod do problematiky čerpadel

Čerpadla prošla od svých počátků rozsáhlým vývojem. V průběhu vývoje se čerpadla neustále zdokonalovala, až do podoby jaké je známe dnes. V dřívějších dobách se ke zvedání vody ze studní, využívalo nádob, které byly zavěšovány na dlouhých dřevěných tyčích, následovně tyto nádoby byly zavěšovány na lanech, jenž se poté navíjela na různá válcová navíjedla. Tato čerpací zařízení byla ve většině případů poháněna silou lidskou, popřípadě silou zvířecí. V pozdějších dobách se začalo využívat síly větrné. Později byla také zkonstruována čerpadla, jenž mohla vytlačovat nasávané tekutiny do míst s vyšší polohou. Postupně se čerpadla stala nejvíce rozšířenými zařízeními, jenž člověk ve svém pracovním životě využívá. Čerpadla se v současnosti vyžívají snad ve všech oborech a ve složitějších technických zařízeních. Čerpadla mohou dopravovat různé kapaliny jako je olej, voda, nafta. S jejich pomocí se dají dopravovat i kašovité látky. V současné době se čerpadla hojně využívají v hydraulice, kde se často využívají v hydraulických systémech k řízení strojů. Pomocí hydraulických zařízení se také nahrazují mechanické spojky a převody, jenž jsou především využívány u současných moderních motorových vozidel. Důležité je také vědět, že konstrukce čerpadla se liší dle druhu dopravované látky i druhu pohonu. Se zvyšující se cenou energií je v dnešní době důležité konstruovat a využívat čerpadla s nízkou energetickou náročností a s vysokou účinností a bezpečností.

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [1]

## 1.1 Rozdělení čerpadel

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [1], [3]

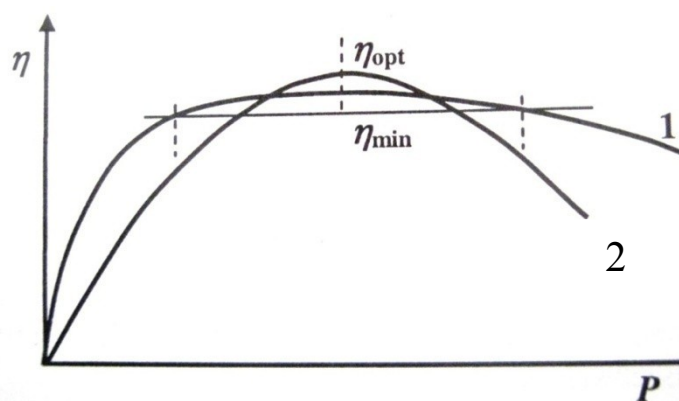
Všechna čerpadla můžeme dle pracovních podmínek rozdělit do tří základních skupin.:

- 1) Hydrostatická čerpadla - jedná se o čerpadla s přímou změnou mechanické práce v polohovou (potencionální) energii - čerpadla s vratnými písty, zubová čerpadla, čerpadla rotačními písty
- 2) Hydrodynamická čerpadla - jedná se o čerpadla s nepřímou změnou mechanické práce v polohovou (potencionální) energii - čerpadla axiální, diagonální, odstředivá
- 3) Čerpadla proudová (trkače, injektory)

Hydrodynamická čerpadla - uplatňují se především v provozech, kde je potřeba velkých výkonů (energetika, vodní hospodářství)

Hydrostatická čerpadla - uplatnění především oblastech, kde je potřeba vysokých tlaků (chemické provozy, lisovací zařízení)

V oblastech, kde je nutno především kapaliny čerpat je možno využívat jak čerpadla hydrostatická tak i čerpadla hydrodynamická. Zde volba druhu čerpadla především závisí na pořizovacích a provozních nákladech čerpadel.



Obr. 1.1 Srovnání účinnosti hydrostatického a hydrodynamického čerpadla [5]

1 - hydrostatické čerpadlo

2 - hydrodynamické čerpadlo

### **Dále můžeme čerpadla rozdělit:**

#### **Podle druhu pohonu:**

- čerpadla motorovým pohonem (spalovací motor, elektrický motor)
- čerpadla s jiným pohonem (zvířecí, lidský pohon)

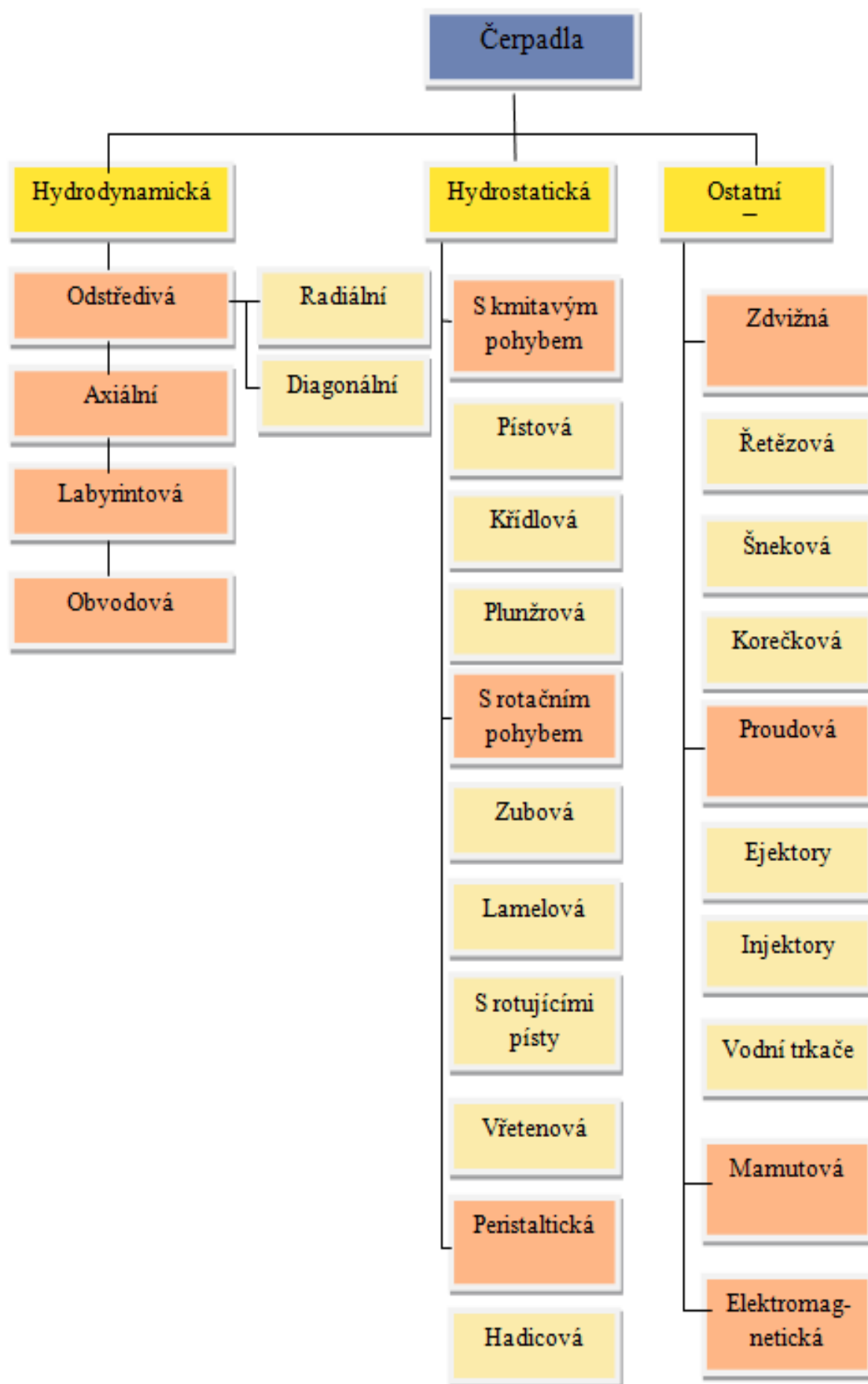
#### **Podle polohy hlavního hnacího hřídele:**

- vertikální čerpadla
- horizontální čerpadla

#### **Podle počtu stupňů oběžných kol:**

- jednostupňová - tato čerpadla mají pouze jeden stupeň => mají pouze jedno oběžné kolo
- vícestupňová - jde o čerpadla, která mají větší počet oběžných kol, tato čerpadla mají schopnost vyvinout větší tlak





Obr 1.2 Obecné schéma rozdělení čerpadel

## 1.2 Hlavní parametry čerpadel

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [3]

Mezi hlavní parametry čerpadel patří:

- dopravní výška  $H$  – jedná se o energii předanou každému kilogramu kapaliny, dopravní výška je udávána v  $[m]$
- otáčky  $n$  - parametr charakterizující pohon čerpadla
- průtok  $Q$  - udává objem dopravované kapaliny za jednotku času  $[m^3 \cdot s^{-1}]$  nebo  $[m^3 \cdot h^{-1}]$ , popřípadě v hydraulice je využíváno jednotky  $[l \cdot min^{-1}]$ , tato veličina je většinou rozhodující při návrhu velikosti čerpadla

### Druhy proudění :

Druhy proudění jsou rozlišovány dle Reynoldsova kritéria  $Re$  :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

kde :

$v$  - střední rychlost v potrubí

$d$  - průměr potrubí

$\nu$  – kinematická viskozita

Dle kritické hodnoty  $Re_{krit} = 2320$ , rozlišuje zda-li se jedná o proudění laminární nebo turbulentní.

V případech, kde je:

$Re < 2320$  se jedná o laminární proudění

$Re > 2320$  se jedná o turbulentní proudění

### 1.3 Hydrostatická čerpadla

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [1], [3]

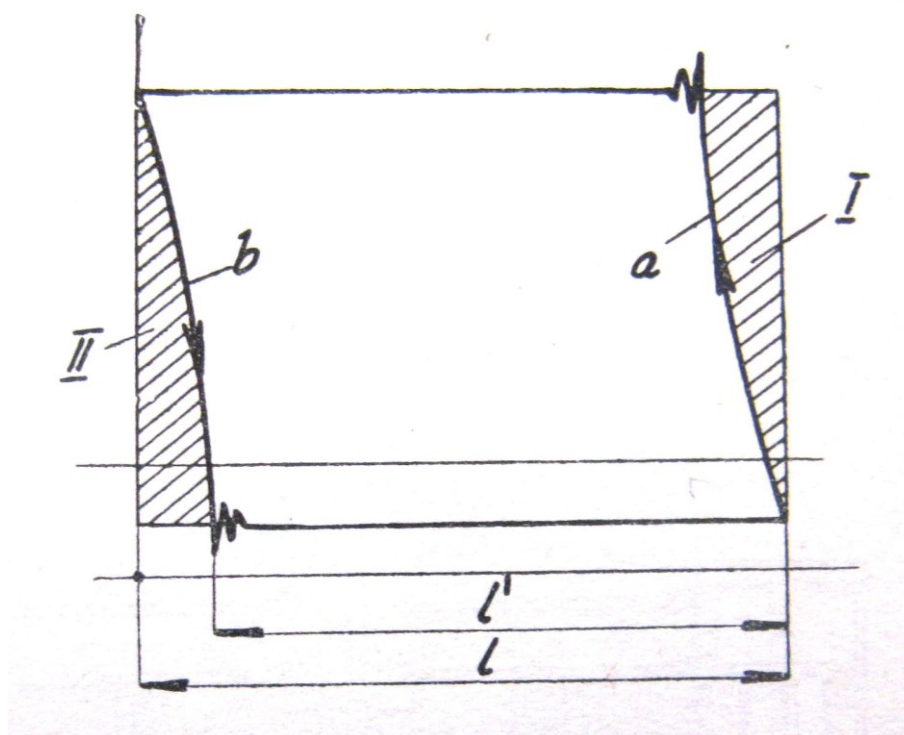
Jsou to čerpadla, kde dochází k přímé přeměně mechanické práce v potenciální (polohovou) energii. U těchto čerpadel dochází k vytlačování kapaliny přímým tlakem pracující součásti čerpadla, například pístem, který je poháněn klikovým mechanismem. Ten tlačí přímo na kapalinu, která byla nasáta do pracovního prostoru čerpadla a vytlačí ji z tohoto prostoru ven. Na obdobném principu pracují i písty u rotačních čerpadel, popřípadě boky zubů u zubových čerpadel. Mechanická práce, jenž je dodávána pohonnou jednotkou (elektromotor, spalovací motor, atd.) je přímo přeměňována v energii tlakovou (potenciální). Při přeměně energie dochází k určitým ztrátám. U odstředivých čerpadel se nejprve většina mechanické práce mění v pohybovou energii dopravované kapaliny a teprve poté se tato energie přeměňuje v energii potenciální, což znamená nárůst tlakové energie ve výtlaku čerpadla. U čerpadel s dvojitou přeměnou nastávají větší hydraulické ztráty (tření, rázy), než u čerpadel s jednou jednoduchou přeměnou. Přestože čerpadla s jednoduchou přeměnou (pístová, zubová křídlová, s rotačními písty) mají lepší účinnost než čerpadla s dvojitou přeměnou (odstředivá, axiální), tak jsou více využívána čerpadla druhé skupiny (odstředivá, axiální), protože mají stejných výkonostních parametrech daleko menší rozměry než čerpadla pístová. Z tohoto důvodu je poté menší spotřeba materiálu a ve výsledku i menší pořizovací cena. Čerpadla z první skupiny jsou konstruována pro menší výkony, obvykle s využitím s motorového popřípadě i ručního pohonu. Současně lze tvrdit, že čerpadla z této skupiny jsou vhodná i pro velmi vysoké tlaky. Při spouštění a provozu hydrostatických čerpadel je důležité myslet na to, že jejich průtok je nezávislý na tlaku. Tlak se u hydrostatických čerpadel nastavuje automaticky, dle odporu potrubí. Průtok se mění s narůstajícím tlakem jen minimálně a to vlivem průsaků a netěsností. Charakteristika hydrostatických čerpadel bývá označována jako tvrdá. U hydrodynamických čerpadel je charakteristika měkká. Hydrostatická čerpadla musí být chráněna pojistným tlakovým ventilem, umístěným ve výtlaku, proti převelkému nárůstu tlaků

### 1.3.1 Pístová čerpadla

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [1], [3]

#### Jednočinná pístová čerpadla

Využívají se především pro malé výkony a průměr pístu by neměl být větší než 150 mm, protože u velkých průměrů pístů, pístová ucpávka nedokáže udržet dostatečnou těsnost kolem celého obvodu pístu a též nelze ji rovnoměrně utahovat. V případech, kdy je ucpávka utažena pouze z jedné strany se může píst zadřít. Jednočinná čerpadla, která jsou poháněna motorovou silou, je nutno doplnit o velké setrvačníky a větrníky z důvodu zajištění plynulého čerpadla. Tato čerpadla mají pouze jeden sací a výtlačný ventil, ventily jsou ovládány samočinně.



Obr. 1.3 Diagram pístového čerpadla (skutečný) [1]

Po ukončení sacího zdvihu, začne část nasáté kapaliny protékat částečně pootevřeným sacím ventilem protékat zpět, proto křivka nárůstu tlaku zvolna stoupá. Též po skončení výtlačku se část kapaliny vrací přiootevřeným výtlačným ventilem, zpět do pracovního prostoru čerpadla. Proto tlak pozvolna klesá a teprve poté se začne kapalina nasávat. Tlakové změny, jenž se projevují na počátku sání a vytlačování jsou zapříčiněny chvěním

ventilových talířů. Kapalina je čerpadlem nasávána jen v průběhu zdvihu  $l'$ . Čím větší je výtlačný tlak, nebo zdvih ventilů, popřípadě je čerpadlo rychloběžnější, tak tím větší je rozdíl  $l - l'$ . Při konstrukci čerpadla je na tento rozdíl nutno myslet, protože nevhodnou konstrukcí se může tento rozdíl zvýšit.

Pístové čerpadlo by mělo dopravovat toto objemové množství:

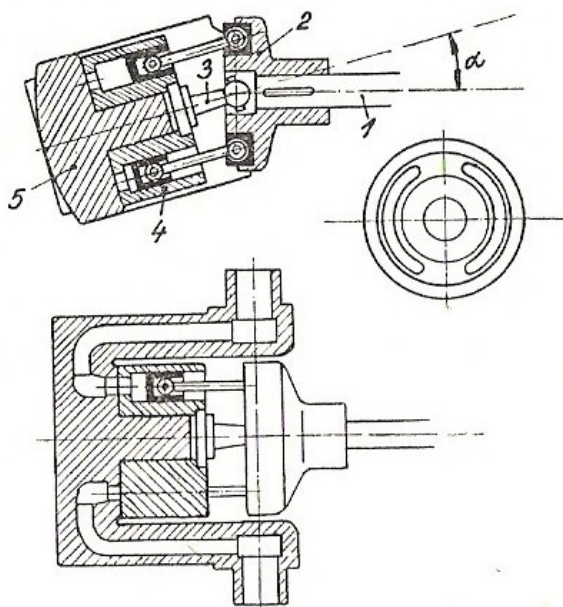
$$Q_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot l \cdot n [l \cdot \min^{-1}] \quad (2)$$

### 1.3.2 Čerpadla s rotujícími písty

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [1]

Jedná se o čerpadla, která vykonávají svou funkci bez použití ventilů. Kapalina je nasávána a vytlačována kanálky, kolem kterých rotují válce s písty. Výkon lze u těchto čerpadel dobře regulovat. Množství dodávané kapaliny může být sníženo teoreticky až téměř k nule. Tato čerpadla mohou pracovat i při změně smyslu otáčení. Poté se změní sací hrdlo ve výtlačné hrdlo a naopak. Regulace výtlačného množství se provádí změnou výstřednosti válce. Při rotaci rotoru jsou písty odstředivou silou přitlačovány k válci, každý píst v průběhu jedné otáčky vykoná jeden sací a jeden výtlačný zdvih. Množství dopravované kapaliny ve výtlačku je závislé na velikosti zdvihu a průměru pístů. Počet otáček u těchto čerpadel bývá většinou  $500-1500 \min^{-1}$ . Za velkou nevýhodu se u zmiňovaných čerpadel považuje to, že s rostoucím výtlačným tlakem, klesá jejich výkonnost. U složitějších strojních zařízení, kde je potřeba, aby se při zvyšujícím tlaku nesnižoval výkon čerpadla, je nutno umístit do hydraulického zařízení škrtkový ventil, který uměle zvyšuje odpor kapaliny a zajišťuje dosažení stále stejného výtlačného tlaku a výkonu čerpadla. Množství dopravované kapaliny je určováno dle vztahu (3).

$$Q = i \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \cdot \eta_v [l \cdot \min^{-1}] \quad (3)$$



Obr. 1.4 Čerpadlo s rotujícími písty [1]

### 1.3.3 Rotační čerpadla komorová

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [1], [4]

Rotační komorová čerpadla fungují na stejném principu jako čerpadla pístová, kdy výtlačné zařízení čerpadla je v přímém kontaktu s kapalinou a zvyšuje její tlak. Dochází k přímé přeměně mechanické práce v potenciální energii kapaliny. Jelikož je jejich běh stejnoměrný, tak se využívají především pro čerpání vazkých kapalin, jako jsou oleje, nafta. Některé druhy jsou schopny vytvořit na sací straně vakuum. To znamená, že jsou schopna nasát čerpanou kapalinu, bez toho, aniž by byla zalita kapalinou před uvedením do chodu. Samonasávací výška především závisí na výrobní přesnosti čerpadla a také na opotřebení čerpadla, hustotě, teplotě a viskozitě kapaliny. S rostoucí viskozitou kapalin musí klesat otáčky čerpadla. Jelikož se stoupající teplotou viskozita kapalin klesá, tak se vyrábějí i čerpadla s topným pláštěm. Výkonnost tohoto druhu čerpadel se odvíjí dle sací a výtlačné výšky. Se zvyšující se sací a výtlačnou výškou čerpadla klesá objemová účinnost.

Dle konstrukčního provedení se tato čerpadla rozdělují na čerpadla:

- zubová
- s krouživými písty
- křídlová

## Zubová čerpadla

Zubová čerpadla patří mezi nejrozšířenější a nejjednodušší čerpadla v hydraulice. Jsou především využívána k hydraulickému řízení strojů, k mazání atd.. Za jejich pomoci lze dosáhnout i poměrně vysokých tlaků. Maximální tlak, který lze tímto druhem čerpadel dosáhnout je 16 MPa. Čerpadla jsou konstruována pro otáčky  $10 - 3000 \text{ min}^{-1}$  a výkon až  $120 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Jejich nevýhodou je docela nízká účinnost, jenž se pohybuje v rozmezí (0,6 - 0,9) a velmi rychle se zmenšuje s opotřebením čerpadla. Tato koncepce čerpadel je velmi vhodná pro dopravu oleje, jelikož součásti čerpadla jsou dobře mazány, zmenšuje se tření a také opotřebení součástí čerpadel. Ztráty nastávají vlivem mechanického tření mezi boky zubů, netěsností, tření v ložiskách, vířením kapaliny. Zubová čerpadla musí být vyrobena z kvalitního materiálu, který opotřebovává co nejméně. Jejich výroba musí být přesná. Nevýhodou zubových čerpadel je nerovnoměrné množství dodávané kapaliny a to z důvodu, že se velikost nasávaného a vytlačného prostoru mění během záběru jednotlivých párů zubů. To znamená, že se mění objem nasávané a vytlačené kapaliny, ale i tlak.

### 1.4 Hydrodynamická čerpadla

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [1], [3], [4]

V čerpací technice jsou za nejvíce používaná čerpadla považována hydrodynamická čerpadla. Mechanická práce, která je dodávána motorem se nejprve mění v pohybovou energii (kapalina dostává rychlost proudění), která se později přeměňuje v energii tlakovou. S dvojitou změnou energie nastávají také dvojité ztráty, proto je účinnost těchto čerpadel obvykle menší než u hydrostatických čerpadel. Výhodou je, že kapalina protéká axiálním, odstředivým i diagonálním čerpadlem rovnoměrně se stálým proudem. Nenastává u nich zpomalování ani zrychlování kapaliny důsledkem nerovnoměrného pohybu pístu, proto u těchto čerpadel není nutno větrníků. Hydrodynamická čerpadla pracují s vyšším počtem otáček a celkové rozměry čerpadla jsou menší. Z tohoto důvodu jsou také levnější než čerpadla pístová. K pravidelnému chodu čerpadel není potřeba setrvačníku, jelikož tato čerpadla mají pravidelný chod. Při pravidelném chodu je také vyšší mechanická účinnost. Zvýšení mechanické účinnosti, nicméně nemůže vykompenzovat větší ztráty zapříčiněné vířením kapaliny, třením v kapalině, objemové

ztráty způsobené prostupem kapaliny z výtlačné části kolem oběžného kola, nazpět do sacího prostoru čerpadla. Celková účinnost odstředivých čerpadel je přibližně 0,77, zatímco u pístových čerpadel je tato hodnota asi 0,88. Přesto tyto čerpadla mají nižší celkové provozní náklady. Pouze pro nejvyšší tlaky (20 - 30MPa) není vhodné hydrodynamická čerpadla uplatňovat.

### **1.4.1 Odstředivá čerpadla**

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [1], [2],

Odstředivá čerpadla fungují na principu, že ve skříni čerpadla rotuje oběžné kolo čerpadla, kterým je nasávána kapalina a poté je vytlačována přes převaděč do takzvané spirální skříň. U malých dopravních výšek můžou tato čerpadla pracovat i bez převaděče. Pro dopravu kapalin do vysokých výšek je třeba použít několikastupňová odstředivá čerpadla – několik oběžných kol s převaděči je spojeno za sebou.

#### **Jednostupňová odstředivá čerpadla**

Jsou vyráběny v normalizovaných řadách, které jsou logaritmičsky odstupňovány. Normalizace jednotlivých dílů je výhodná jak pro jak pro výrobce (z důvodu velkosériové výroby) tak i pro skupinu provozovatelů (z důvodu malého počtu náhradních dílů). Do této kategorie čerpadel patří i takzvané kozlíkové čerpadlo, kde je oběžné kolo s přívodem kapaliny v ose čerpadla, uloženo letmo ve valivých ložiskách, která jsou mazána olejem. Ložiskové těleso označované jako kozlík je smontováno s tělesem čerpadla. Tato čerpadlo se nejčastěji vyrábí z litiny. Konstrukční provedení tohoto druhu čerpadel je řešeno stavebnicově. To znamená, že při záměně jednotlivých prvků dojde ke změně parametrů čerpadla. Nebo při změně materiálu součástek je možno čerpat kapaliny s různými fyzikálními vlastnostmi. U kapalin, které jsou zdraví škodlivé nebo výbušné, je vyžadována úplná těsnost čerpadla. Kvůli této požadované úplné těsnosti byla vyvinuta bezucpávková čerpadla, kde ucpávka je nahrazena magnetickou spojkou.



## **Popis hlavních částí odstředivého čerpadla**

### **Oběžné kolo**

Oběžné kolo přenáší mechanickou práci na kapalinu. Kapalina poté obdrží kinetickou a tlakovou energii. Oběžná kola se vyrábějí z litiny nebo bronzů a tloušťky stěn jsou malé. Oběžná kola jsou na hřídeli upevněna za pomoci dvou protilehlých per. Axiální poloha je zajištěna stavěcími kroužky, popřípadě trubkami, které jsou navlečené na hřídeli. K upevnění oběžných kol na hřídel se nesmějí používat klíny, protože by mohlo dojít k rozestředění oběžných kol s osou hřídele. Oběžná kola, která nemají krycí stěny lopatek, jsou označována jako otevřená kola, využívají se především při čerpání kalů. U dvojitého oběžného kola vzniká pouze velmi malá axiální síla, která je způsobena nemožností vyrobit obě kola totožná. Jedno kolo je levé a druhé pravé. Tato malá axiální síla je na jedné straně zachycena axiálním kuličkovým ložiskem. Na straně druhé musí mít ložisko možnost pohybovat se v axiálním směru.

### **Pevné kolo**

Bývá také nazýváno jako kolo rozváděcí. Podobá se rozváděcímu kolu turbíny, s tím rozdílem, že nemá natáčivé lopatky, přestože by to bylo vhodné při řízení množství kapaliny změnou otáček. V převodním kole nastává změna kinetické energie kapaliny na energii tlakovou. U nízkotlakých čerpadel bývá rozváděcí kolo narazeno spirálou čerpadlového tělesa - jedná se o speciální převodní kolo, které má pouze jednu lopatku. Rozváděcí kola jsou vyráběna z litiny nebo z bronzů. Podle konstrukce čerpadla se řídí návrh uložení kola, tvaru a také připevnění kola v tělese čerpadla.

### **Těleso čerpadla**

Těleso čerpadla musí obsahovat sací a výtlačné hrdlo. Sací prostor bývá konstruován tak, aby usměrňoval kapalinu a dodával ji k oběžnému kolu pokud možno co nejkratší a nejméně náročnou cestou. Výtlačný prostor musí mít vhodně navržený tvar, tak aby splňoval požadavky co do směru, rychlosti a také množství kapaliny, která vystupuje z oběžného kola, popřípadě rozváděcího kola. Existují dvojité sací prostory, kde i oběžné kolo je dvojité. Důležitým prvkem tělesa čerpadla jsou kotvící patky k usazení čerpadla na

rá. Konstrukční provedení čerpadla musí umožňovat snadnou montáž a demontáž jak oběžných kol, tak i rozváděcích.

## Hřídel

Hřídel oběžného kola je uložen v ložiscích a je utěsněn ucpávkou. V případech, kdy je motor napřímo spojen s hřídelí čerpadla, musí být hřídel na svém konci opatřena pružnou spojkou. Pohon může být zajištěn i přes řemenici. V tomto případě pak odpadá nutnost spojky. Hřídele jsou nejčastěji vyráběny z oceli. V některých místech je nutno povrch hřídele chránit navlečením bronzového pouzdra, popřípadě pouzdra z jiného odolného materiálu. Jsou-li čerpány agresivní kapaliny, musí se hřídel vyrobít z odolného kovu (nerezavějící oceli). Hřídel odstředivého čerpadla, na niž jsou nasazena oběžná kola a spojka se musí vyvážit jak staticky, tak i dynamicky. Je-li hřídel zatížen velkými silami od kol a spojek nebo je dlouhý, je nutno provést kontrolu na kritické otáčky hřídele. Při kritických otáčkách hřídele je odstředivá síla všech hmot na hřídeli připevněných v rovnováze s pružnou silou samotného hřídele při určitém prohnutí hřídele. Je-li hřídel prohnut, tak že se nemůže vlastní pružností narovnat zpět. Poté se otáčí s křivou osou a stroj pracuje neklidně. Náležitá úhlová rychlost je označována jako kritická úhlová rychlost  $\omega_k$  a náležitý počet otáček jako kritické otáčky  $n_k$ . Zvýší-li se otáčky hřídele nad kritické otáčky, získá odstředivá síla nadvládu nad pružnou silou hřídele. Poté se hřídel prohne až tak, že může hřídel zlomit. Kritické otáčky hřídele jsou nebezpečné i pro vyvážené a vystředěné hřídele, protože stačí pouze velmi malé prohnutí hřídele, které může být zapříčiněno neplánovaným otřesem. Poté deformace vlivem odstředivé síly rychle rostou až do nepřipustných hodnot. Při zvyšování otáček nad kritickou mez, zabrání se nadměrnému vychýlení hřídele. Hřídel se uklidní do chvíle, než nastanou kritické otáčky druhého řádů. Stroj musí být provozován v otáčkách, které jsou velice vzdáleny od kritických otáček, jinak by byl chod stroje neklidný, obzvláště pokud není hřídel s připevněnými hmotami řádně vystředěn a vyvážen. Provozování čerpadel s nadkritickými otáčkami se praxi vyskytuje velmi zřídka. Na velikost kritických otáček má také vliv konstrukční provedení uložení hřídele čerpadla.

## **Fréma**

Jednotlivé části čerpadla včetně pohonu čerpadla se připevňují na rám čerpadla (frému). Obvykle se jedná nízkou odlitou stolicí s lištami pro upevnění patek motoru a čerpadla. Tyto komponenty jsou k rámu připevněny za pomoci závrtných šroubů s maticemi nebo šroubů se šestihrannou hlavou. Směřuje-li sací hrdlo čerpadla dolů, je ve frémě otvor pro průchod sacího hrdla a potrubí. Musí-li být fréma dlouhá, tak se může skládat z více částí (dvoudílná, třídílná fréma). Poté je zvlášť důležité, aby osa hřídele a motoru byly v jedné ose (soustředné) a to vždy i po demontáži komponent a jejich opětovném sestavení. Přesná poloha se zajistí montážními kolíky. Existují i frémy, které jsou sestaveny z válcovaných profilů a plechů. Větší čerpadla převážně mají frému svařovanou ze silnostěnných plechů. Fréma se k základovému zdivu přišroubuje za pomoci základových šroubů, které mají ve spodní části zesílený dřík se záseky. Díry pro základové šrouby v základovém zdivu se vyvrtávají větší. Do děr se nejprve vloží základové šrouby, poté se na ně nasadí fréma. Teprve poté se na šrouby nasadí podložky a matice. Následovně se fréma vypodloží ústřížky z plechu, tak aby byla osa čerpadla vodorovná a podlijí se cementovou kaší, která vyplní i větší díly základových děr. Po vytvrzení cementové kaše se šrouby přitáhnou.

## **Hřídelové spojky**

Slouží ke spojení hřídele čerpadla a hnacího motoru. U čerpadel se musejí využívat poddajné spojky, pokud možno s izolačními vlastnostmi. Hřídelová spojka musí v axiálním směru umožňovat malý posuv hřídele čerpadla vůči hřídeli motoru. Nesmí ale vyvozovat žádnou axiální sílu. Spojka by měla také umožnit také nepatrnou úhlovou odchylku osy hřídele motoru a čerpadla.

## **Nejpoužívanější druhy spojek**

### **Čepová spojka**

Je tvořena dvěma kotouči s náboji, kde jeden kotouč je nasazen na hnacím hřídeli a druhý kotouč je usazen na hřídeli hnaném. V obou kotoučích jsou otvory, ve kterých jsou nasazena pryžová pouzdra. Kotouče jsou spojeny čepy, které jsou uloženy v pryžových pouzdrech.

## Spojka Bibby

Přenos obvodové síly zajišťuje ocelová pružina, která je navinuta hadovitě a je vsunuta do mezer ozubení po celém obvodu kotoučů. Zuby jsou částečně sraženy z toho důvodu, aby se mohla pružina prohnout při namáháním způsobeném obvodovou silou. Prohnutí je příčinou malé axiální síly. Pružina je po celém svém obvodu kryta dvoudílným obalem, jehož půlky jsou k sobě přitaženy šrouby. V jednom z kotoučů musí být větší otvory pro šrouby, aby nedocházelo namáhání šroubů obvodovou silou. Obal spojky je vyplněn mazivem pružin.

## Zubová spojka

Skládá se ze dvou kotoučových nábojů s vnějším ozubením. Tyto náboje jsou spojeny objímkou s vnitřním ozubením. U této spojky je poddajnost dosažena speciálním tvarem zubů a větší a větší axiální vůlí mezi oběma ozubenými věnci. Boky zubů jsou tvořeny oblouky a vršek zubů je zaoblen. Ozubení zalito olejovou lázní.

## Obručová spojka (periflex)

Obručová spojka zajišťuje klidný chod stroje a utlumuje nerovnoměrný přenos krouticí momentu. Spojka je tvořena dvěma kotoučovými náboji, které spolu se dvěma přítlačnými kotouči svírají pryžovou obruč. Tuhost sevření pryžové obruče je závislá na dotažení šroubů. Tyto šrouby se dotahují momentovým klíčem na předepsaný moment. Obručové spojky se využívají při teplotách  $0^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$  a v prostředích, kde nemůže dojít ke kontaktu s ropnými látkami, oleji a kyselinami. Při teplotách nižších, popřípadě vyšších, než je stanovené rozmezí, dochází snížení životnosti pryžové obruče. Obručové spojky dovolují úhlovou nesouosost až  $5^{\circ}$  a axiální posuv hřídelů až 8mm. Tento druh spojek se především využívá pro menší krouticí momenty.

## Pohon čerpadel

Nejčastěji se k pohonu čerpadel využívají elektrické motory. Pístová čerpadla musejí být poháněna elektrickým motorem s převodovým soustrojím. Téměř všechny ostatní druhy čerpadel mohou být poháněny elektromotorem napřímo (bez přídavného převodu). K změně velikosti otáček mezi elektromotorem a pístovým čerpadlem se nejčastěji využívá převodu s ozubenými koly, protože zde nenastává skluz. Počet zubů ozubených kol by měl být mezi sebou vzájemně nedělitelný. To z důvodu stejnoměrného opotřebení všech zubů. Taková soukolí pak mívají tišší chod. U čerpadel s vyšším výkonem bývají využívána šípová ozubená kola. V místech, kde je potřeba regulovat výkon čerpadla je využíváno redukčních skříní s měnitelným převodovým poměrem. Chceme-li u zubového čerpadla měnit množství dopravované kapaliny, musíme rovněž využít měnitelných převodů. Zubová čerpadla mohou být i napřímo spojena s elektrickým motorem. Velikost počtu otáček odstředivých, axiálních, diagonálních čerpadel je stejná s počtem otáček elektrických motorů. Nejobvyklejší druhy čerpadel mají  $1450 \text{ min}^{-1}$ , nebo  $2900 \text{ min}^{-1}$ . U čerpadel s malým výkonem se k pohonu mohou využívat jednofázové elektromotory. U jednofázových elektromotorů při poklesu napětí dochází k velkému poklesu otáček, proto je vhodnější všude využívat třífázové elektromotory. Jednofázové motory potřebují ke svému rozběhu tzv. pomocnou fázi, která se po rozběhu vypíná ručně nebo automaticky za pomoci odstředivého vypínače. Pohon spalovacím motorem je především využíván u mobilních čerpadel. Naftové motory se nejčastěji používají k pohonu vodárenských čerpadel při odstávce elektrického proudu. Hasičské stříkačky bývají zase poháněny benzinovými motory. Jedná se o automobilové motory, které mají otáčky shodné s obvyklým počtem otáček a mohou být spojeny s čerpadlem napřímo.

## Montáž čerpadel

Čerpadla jsou obvykle z výrobních podniků dodávána již jako složená. Na místě, kde má čerpací soustrojí pracovat probíhá už pouze montáž celého celku čerpadla. K čerpadlu je připojeno sací a výtlačné potrubí, probíhá spojení čerpadla s motorem. Dále musí být soustrojí dobře ustaveno. Odlitky součástí čerpadel musí být před montáží řádně očištěny od formovacího písku. Písek, který nebyl z odlitků důkladně očištěn se během provozu stroje uvolňuje a způsobuje poškození těsnících ploch čerpadel (písty, ventily). Písek se může také zadírat do ucpávek, popřípadě může znečistit čerpanou kapalinu. Z tohoto důvodu musí být před montáží čerpadla všechny díly zkontrolovány a případné nedostatky

odstraněny. Při sestavování čerpadla musejí být příruby a všechny ostatní spoje důkladně utěsněny. Šrouby na čerpadle se musí být vždy dotahovány rovnoměrně po celém obvodu. Šrouby se utahují proti sobě. Čerpadlo, které je dobře sestaveno by mělo jít zlehka protočit rukou. Při montáži čerpadla na rám, je třeba pomýšlet na možné deformace rámu nebo základu. Po zdeformování by byly obě hřídele nesouosé a ložiska by se více zahřívala a rychleji opotřebovávala. Proto se čerpadlo nebo fréma ustaví na základ a podkládáním kousků plechů vyváží do vodorovné polohy. Souosost hřídelů a správné ustavení se kontroluje měřením na spojce při otáčení hřídelů. Velikost mezery mezi kotouči spojky musí být všude stejná. Po přesném ustavení se fréma podlijí cementovou kaší a po jejím vytvrdnutí se dotáhnou základové šrouby a znova se kontroluje souosost hřídelů. Nastane-li nějaká úchylna, tak se musí čerpadlo nebo motor podkládat ustavovacími plechy. Až poté lze zahájit montáž sacího a výtlačného potrubí. Potrubí se před jeho montáží musí pořádně vyčistit, aby pak do čerpadla nepronikaly nečistoty. Zkouška těsnosti celého systému se provádí zalitím čerpadla a potrubí. Výška hladiny nesmí klesat. Celé soustrojí musí být umístěno na suchém místě. Kapalina, která prosakuje přes ucpávku čerpadla musí být odváděna, aby nedocházelo ke zvlhčování vzduchu a narušování základu. Nadměrné zvlhčení vzduchu by mělo neblahé následky na elektrická zařízení soustrojí.

### **Ložiska čerpadel**

Uspořádání ložisek v čerpadle se liší dle jejich umístění v čerpadle (mokré, suché prostředí), způsobu mazání a velikosti zatěžujících sil. K přenosu radiálních a axiálních sil působících na rotor středně velkých a malých čerpadel se využívají kluzná i valivá ložiska. Valivá ložiska jsou ve většině případů mazána olejem. Volba ložiska se odvíjí od požadované životnosti ložiska a velikosti průměru hřídele. Životnost ložisek by měla být 40 000 – 200 000 hodin provozu. Tato životnost ložisek se navrhuje dle plánovaných termínů oprav zařízení. Kluzná ložiska dostávají přednost v prostředích s vyšší teplotou, při práci agresivními kapalinami a také tam se především požaduje nízká hlučnost. U velkých čerpadel se využívají hydrostatická nebo hydrodynamická kluzná ložiska, popřípadě axiální segmentová ložiska.

### 1.4.2 Axiální čerpadla

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [1], [2], [4], [6]

Axiální vrtulová čerpadla mají největší uplatnění v oblastech malých měrných energií a také tam, kde je potřeba velkých průtoků kapalin. Jedná se o nejvíce rychloběžná čerpadla. Axiální čerpadla se uplatňují především zemědělství a potravinářském průmyslu. Oběžné kolo axiálního čerpadla je tvořeno malým počtem plochých lopatek, které mají podobný tvar jako vrtule letadla. Axiální čerpadla se vyrábějí sériově dle požadovaných parametrů. Předností toho druhu čerpadel je jejich jednoduchá konstrukce. Využívají se především k čerpání vody a kalů. Oběžné lopatky kola je možno za klidu jednotlivě nastavovat. U axiálních čerpadel se využívají valivá ložiska, která jsou mazána olejem. Výměna mazacího oleje se provádí přibližně po 1000 provozních hodin. Axiální čerpadla velkých velikostí se vyrábějí pouze malosériově. Jejich konstrukční řešení se odvíjí od koncepce čerpacího zařízení. Nejobvykleji se používá uspořádání s usazením v mokré jímnici, kde je tíhová síla čerpadla bez rotoru čerpadla přenášena na takzvaný strop nasávací jímký. Tíhová síla elektromotoru a axiální zatěžující síla od rotoru čerpadla jsou zachyceny základem ve strojovně čerpacího zařízení. Radiální ložisko na spodní straně čerpadla je mazáno čerpanou kapalinou, zbylá ložiska jsou mazána olejem. K regulaci výkonnostních parametrů axiálních čerpadel se využívá natáčení oběžných lopatek. V minulosti se především využívalo ruční natáčení lopatek za provozu stroje. Se zvyšujícími nároky na čerpací techniku se v současné době k regulaci axiálních čerpadel využívá hydraulického natáčení lopatek. Ruční natáčení lopatek se používá v současnosti pouze pro požadované nastavení lopatek za klidu. U oběžného kola vrtulového axiálního čerpadla vykonává práci v proudu kapaliny každá lopatka samostatně. Dobře navržená axiální čerpadla se vyznačují vyšší účinností, než mají čerpadla odstředivá. Při stejných výkonnostních parametrech (množství dopravované kapaliny, dopravní výška) mají axiální vrtulová čerpadla menší hmotnost, rozměry a jsou také levnější. Nevýhodou axiálních čerpadel je jejich malá dopravní výška a také malá nasávací schopnost.

## 1.5 Ložiska

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [7]

Ložiska jsou strojní součásti, které slouží k uložení výkyvných nebo rotačních součástí (hřídele, čepy). Zachycují síly působící na tyto součásti, drží je v požadované poloze a umožňují jim rotační pohyb. Ložiska jsou nezbytnými součásti všech strojů. Ložiska patří mezi nejvýznamnější strojní součásti, na jejich funkci závisí chod strojů, jejich přesnost i bezpečnost. Správná funkčnost ložisek je dána jejich konstrukcí, provedením, ale i jejich správným mazáním. Mazivo zabraňuje bezprostřednímu styku součástí, který by způsoboval otěr mezi součástmi. Následkem by bylo rychlé opotřebování a mohlo by dojít až zadření ložisek a odstavení stroje. Bezpečnost, životnost, přesnost, náklady na provoz, a spotřebovaná energie strojů závisí na správném mazání ložisek.

Rozdělení ložisek:

- valivá ložiska - radiální
  - axiální
- kluzná ložiska - radiální
  - axiální

### 1.5.1 Valivá ložiska

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [7], [8], [9]

V současnosti jsou na stroje kladeny stále vyšší výkonnostní požadavky, a proto je nutné, aby rotující součásti (hřídele, čepy) byly uloženy v kvalitních ložiscích. Důležitá je také jejich správná montáž. Valivá ložiska jsou většinou složena z vnitřního a vnějšího kroužku, valivého elementu a klece. Kluzné tření je u valivých ložisek nahrazeno podstatně nižším valivým třením. Malé ztráty třením při provozu a rozběhu stroje patří mezi největší výhody valivých ložisek. Avšak valivá ložiska nelze ve všech případech upřednostňovat před kluznými ložisky a nelze to ani naopak, protože každý druh ložisek má své specifické vlastnosti, jenž mohou být výhodné v určitých provozních podmínkách. Obvykle je velmi složité rozhodnout, který druh ložisek bude pro navrhovaný stroj nejvýhodnější. Proto je nutno znát přesné specifické vlastnosti ložisek. Vhodná volba ložisek má vliv na technické



a ekonomické hledisko provozu stroje. Valivá ložiska se dle směru zatížení dělí na radiální a axiální. Radiální ložiska přenášejí zatížení, které je kolmé na osu rotace ložiska. Axiální ložiska slouží k přenášení sil ve směru rotace ložiska. Avšak radiální ložiska jsou schopna částečně přenášet i síly axiální a axiální ložiska přenášet síly radiální.

Hlavní výhody valivých ložisek:

- Snadná montáž a údržba
- Nízká spotřeba maziva
- Můžou být plně zatížena při rozběhu a doběhu stroje, provozu i v klidu stroje
- Nemusejí se nechávat zaběhnout, mohou se po namontování ihned plně zatížit
- Mají nižší třecí moment, a proto vytváří méně tepla a nemusí se chladit
- Ložiska obvyklých rozměrů jsou normalizována a jsou levná
- Jsou schopna pracovat i při vysokých teplotách
- Stroje využívající valivá ložiska se vyznačují vysokou mechanickou účinností
- Mají vyšší odolnost proti zadření v případech, kdy jsou nedostatečně mazána

Nevýhody valivých ložisek:

- Valivá ložiska mají obvykle větší rozměry a vyšší hmotnost, než ložiska kluzná.
- Ložiska nenormalizovaných rozměrů se musejí nechávat vyrábět na zakázku a mají vysokou cenu
- Mají vyšší hlučnost

### **Poškození valivých ložisek**

K úplné destrukci ložiska za provozu stroje dochází jen v ojedinělých případech. Ve většině případů životnost ložisek je vyšší než plánovaná životnost stroje. Poškozování ložisek, které může vést až k úplné havárii ložiska je způsobováno řadou různých příčin. Každá příčina se projeví příznačným druhem poškození ložiska, ten vytváří na ložisku charakteristické znaky poškození. Po prohlídce ložiska je možno příčinu poškození odhalit a následně ji odstranit. Ve většině případů je poškozování ložisek zapříčiněno špatným mazáním, únavou povrchových ploch ložisek, neodbornou montáží a nevhodnými provozními podmínkami.

## **Druhy poškození valivých ložisek**

### **Poškození vznikající před uvedením ložiska do provozu**

Poškození ložiska před uvedením do provozu může být způsobeno vadou materiálu (metalurgické vady). Tyto ložiskové vady mohou také vznikat při obrábění, tepelném zpracování, popřípadě i při nevhodném skladování a montáži.

#### **Vrpy v ložisku**

Vrpy v ložiskách vznikají vtlačováním ostrých předmětů do ložiskových materiálů. Vytvářejí se především při výrobě ložisek a jejich montáži. Vrypu mohou také vznikat proniknutím nečistot do maziva ložiska

#### **Povrchové důlky, porezita materiálu**

Tyto druhy poškození ložiska vznikají už při samotné výrobě ložiska. Důlky na povrchu mohou být následkem špatného dokončovacího obrábění. Povrchy ložiskových materiálů pak nedosahují předepsané drsnosti. Porezitou materiálu jsou myšleny dutiny pod povrchem, které později způsobují odlupování materiálu a poškozování ploch.

### **Poškození ložisek vznikající za provozu**

Poškození tohoto druhu vzniká vlastním provozem ložisek. Do této skupiny například patří poškození ložisek vlivem špatného mazání, přetížení, nevhodného pracovního prostředí a jiné.

#### **Mechanické opotřebení ložisek**

Jedná se o opotřebení, které je způsobené oddělováním velmi malých částic z ložiskových ploch. Vlivem oddělení částic dochází k přímému kontaktu pevných těles. To je důsledkem toho, že výstupky nerovností vnikají do jiné části ložiska. Částice, které vznikly opotřebením, se zachytávají mezi oběma plochami ložiska a jsou do těchto ploch vtiskovány.

### **Teplotní poškození ložiska**

Teplotní poškození vzniká důsledkem špatného chlazení, vysokého zatížení nebo vysoké rychlosti. Nastane-li některý z těchto případů, začne docházet k vytváření většího množství tepla, jenž už ložisko není schopno odvádět a začne se přehřívat. Přehřátí ložiska se projevuje změnou barvy, snížením tvrdosti v některých případech může nastat zadření ložiska.

### **Poškození ložiska abrazivními částicemi**

Jedná se o nežádoucí změnu ložiskových ploch, která je zapříčiněná vzájemným působením funkčních ložiskových ploch, nebo působením abrazivního maziva a funkční plochy. Abrazivní opotřebení se projevuje vytvářením rýh do ložiskových ploch. Vlivem brusného efektu nečistot se ložisko rychle opotřebovává, což se projevuje zvýšenou drsností ploch a jejich zmatněním. Abrazivní částice se mohou vytvářet za chodu ložiska nebo samotné mazivo může jimi být znečištěno.

### **Pitting**

Mezi klasické mechanismy, které mají vliv na životnost valivých ložisek, patří i únavové opotřebení, ke kterému dochází vlivem působení cyklického namáhání valivých tělísek ložiska a oběžných ploch ložiskových kroužků s intenzitou, která nepřevyšuje mez kluzu ložiskového materiálu. Nejprve vznikají malé trhlinky na povrchu materiálu, které se později zvětšují a větví. Poté nastává vypadávání zrn materiálu. Jedná se o pomalé poškození, které se projevuje zvýšeným hlukem a vibracemi. Obvyklým znakem únavového poškození je produkování důlků s lasturovaným lomem, označovaných jako pitting . Tyto důlky mají obvykle kruhový tvar. U tvrdých materiálů mohou mít i hranatý tvar. Velký vliv na tvorbu pittingu má mazivo, které vniká do trhlin. S nárůstem tlaku maziva v uzavřených trhlínách se tyto trhliny zvětšují a dochází k vytváření zmiňovaných důlků.

## 1.6 Termodiagnostika

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [5], [10]

Termodiagnostika patří mezi bezdemontážní metody technické diagnostiky. Tato metoda technické diagnostiky je založená na měření a vyhodnocování teploty povrchů diagnostikovaných součástí. Měření se provádí s pomocí kontaktních a nekontaktních teploměrů. Každá látka ve všech skupenstvích si nepřetržitě vyměňuje tepelnou energii s okolním prostředím a tepelná energie se vyskytuje ve formě elektromagnetického záření. Měření množství vyzařované tepelné energie je základním principem bezdotykového měření teploty, což je v současné době nejvyužívanější způsob měření teploty. Teplota je považována za nejdůležitější termodynamickou vlastnost určující stav látky. V současné době se termodiagnostika využívá v mnoha průmyslových odvětvích. Za pomoci termodiagnostiky jsme schopni odhalovat vznikající poruchy strojů, s předstihem plánovat potřebné opravy a také zajistit bezpečnost a provozuschopnost strojů. Od toho se odvíjí zvýšená produktivita strojů a snížené náklady na provoz a údržbu.

### Teplota

Teplota patří mezi základní fyzikální veličiny soustavy SI, její hlavní měrnou jednotkou je Kelvin [K], vedlejší jednotka je stupeň celsia ( $^{\circ}\text{C}$ ). Teplota je stavová veličina vyjadřující stav termodynamické rovnováhy. To znamená, že termodynamická teplota je pro všechny součásti, které se nacházejí v izolované soustavě stejná. Teplotu jako fyzikální veličinu nelze měřit jako ostatní veličiny přímo. Její měření se provádí za pomoci jiných fyzikálních veličin.

### Termodynamická stupnice teploty

Počáteční hodnota termodynamické stupnice odpovídá takzvané absolutní nule, což je nejnižší hodnota, která nemůže být nikdy dosažena. Lze se k ní pouze přiblížit. Termodynamická teplota se udává v kelvinech. Teplota trojného bodu vody, tzn. při rovnovážném stavu všech skupenství vody je 273,16 K.

## Celsiova stupnice

Základní jednotkou Celsiovy stupnice je tzv. stupeň Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ ). Tato stupnice byla vytvořena z termodynamické stupnice a to posunutím o hodnotu 273,15 K. Abychom zjistili velikost Celsiovy teploty, tak musíme od termodynamické teploty odečíst teplotu 273,15 K.

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - 273,15 \text{ K} \quad (4)$$

Teplotu můžeme měřit i v dalších teplotních stupnicích

- Fahrenheitova [ $^{\circ}\text{F}$ ]
- Rankinova [ $^{\circ}\text{R}$ ]
- Delisleova [ $^{\circ}\text{D}$ ]

### 1.6.1 Teploměry pro kontaktní měření teploty

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [5], [10]

## Dilatační teploměry

Pracují na principu tepelné roztažnosti látek. Pro jednodušší měření se využívá délkové dilatace, je možné počítat i se změnou i objemu. Dilatační teploměry se dále rozdělují na tlakové kapalinové a plynové, bimetalické, parní.

### Bimetalové teploměry

U těchto teploměrů je využíváno rozdílné tepelné deformace kovových pásků. Tyto pásky jsou vždy vyrobeny odlišných materiálů. Nízké pořizovací náklady a snadná údržba jsou hlavními výhodami těchto teploměrů. Za značnou nevýhodu je považována jejich nízká přesnost a pomalá odezva při změně teploty.

## Skleněné teploměry

Skleněné teploměry pracují na principu objemové roztažnosti kapaliny, která je obsažena ve skleněném teploměru. Se stoupající teplotou narůstá objem kapaliny. Tento přírůstek lze rovnou odečíst na kapiláře teploměru, která vyúsťuje z ampulky teploměru. Kapilára je zaplněna vakuem. Výhodou skleněných teploměrů je jejich nízká cena a jednoduchost a přesnost. Jejich nevýhodou je velká křehkost. U skleněných teploměrů se jako roztažná kapalina nejobvykleji používá rtuť.

Použité kapaliny u skleněných teploměrů:

- Rtuť - využívala se dříve pro teplotní rozsah  $-37\text{ °C}$  až  $360\text{ °C}$
- Toluol - využívá se pro teplotní rozsah  $-90\text{ °C}$  až  $100\text{ °C}$  – používá se především k měření nízkých teplot
- Pentalová směs - využívá se pro teplotní rozsah  $-200\text{ °C}$  až  $35\text{ °C}$  – tato kapalina se používá k měření hodně nízkých teplot
- Ethylalkohol - použití pro teplotní rozsah  $-110\text{ °C}$  až  $70\text{ °C}$  – využití při nenáročných měřeních

## Tlakové teploměry plynové

Základním principem plynových tlakových teploměrů je změna tlaku plynu při stále stejné teplotě a tlaku. Tyto teploměry vynikají svou vysokou přesností, velkým měřicím rozsahem ( $-250\text{ °C}$  –  $800\text{ °C}$ ) a mohou pracovat v agresivních prostředích. Jejich nevýhodou je vysoká pořizovací cena a malý nárůst tlaku s teplotou.

Další druhy dilatačních teploměrů:

- Tlakové teploměry kapalinové
- Tyčové teploměry
- Tlakové teploměry parní

## O odporové teploměry

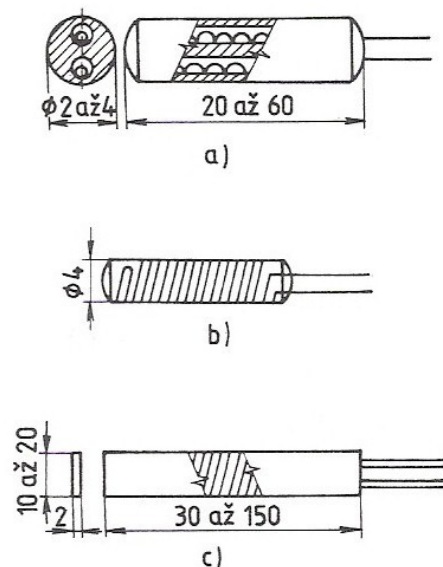
U odporových teploměrů se k měření teploty využívá závislosti odporu materiálu na teplotě. Tato závislost odporu na teplotě je vyjádřena za pomoci teplotního součinitele odporu  $\propto [K^{-1}]$  Odporové teploměry jsou sestaveny z odporového čidla, propojovacího

vedení a měřicího zařízení. Čidla odporových teploměrů se nejčastěji vyrábějí z čistých kovů.

## Materiály odporových měřicích čidel

### Kovové materiály

- Platina - má relativně velký součinitel odporu, který s časem nemění
- Skleněné měřicí odpory - jsou určeny pro snímání teplot do 600 °C
- Keramické měřicí odpory - jsou schopny měřit teploty až do 800 °C
- Vrstvové měřicí odpory - mají velmi malé rozměry a hlavně používají se k měření teploty na povrchu těles
- Nikl - má větší teplotní součinitel odporu než platina, používá se k měření teplot do 200 °C
- Pertinaxové měřicí odpory - využívají se k měření teploty vinutí elektrických zařízení, jejich použití je do 150 °C



Obr.1.5 Měřicí odpory [5]

- a - keramický měřicí odpor
- b - skleněný měřicí odpor
- c - pertinaxový měřicí odpor

## Polovodičové materiály

U polovodičových odporových snímačů teploty může s rostoucí teplotou jejich odpor klesat nebo stoupat. Stoupá-li odpor, má snímač takzvaný negativní koeficient odporu  $\alpha$ . V případě že odpor klesá, má snímač pozitivní koeficient odporu  $\alpha$ .

## Termistory

Termistory mají několikrát větší teplotní citlivost než kovy. Velkou nevýhoda je jejich nelineární charakteristika. Termistory s negativním koeficientem odporu  $\alpha$  jsou označovány jako NTC a termistory s kladným koeficientem odporu  $\alpha$  se značí jako PTC. K měření teploty se výhradně používají NTC termistory, které jsou vyráběny práškovou technologií z oxidů kovů.

### 1.6.2 Bezdotykové měření teploty

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [5], [10]

Bezdotykové měření teploty povrchů těles je založeno na principu snímání elektromagnetického záření, které je tělesy vyzařováno. Bývá také označováno jako infračervená pyrometrie. Každé těleso, jenž má teplotu vyšší než je 0K vyzařuje elektromagnetické záření. S rostoucí teplotou těles roste i velikost vyzařovaného elektromagnetického záření. K bezkontaktnímu měření teploty se využívá část elektromagnetického spektra, které je v rozmezí vlnových délek od 0,4  $\mu\text{m}$  do 1  $\mu\text{m}$ . Toto rozmezí vlnových délek obsahuje oblast viditelného spektra (0,4  $\mu\text{m}$  – 0,78  $\mu\text{m}$ ) a oblast infračerveného spektra (0,78  $\mu\text{m}$  – 1  $\mu\text{m}$ ). Elektromagnetické záření v rozmezí vlnových délek (0,78  $\mu\text{m}$  – 1  $\mu\text{m}$ ) se označuje jako tepelné záření.

Výhody bezkontaktního měření teploty:

- snadné měření teploty rotujících a posouvajících se součástí
- možnost měření teploty na obtížně dostupných místech
- možnost měření teploty z bezpečných míst
- možnost měření rychle měnících se teplot součástí
- možnost měřit velmi vysoké teploty



Nevýhody bezkontaktního měření teploty:

- naměřená teplota může být ovlivněna teplotou okolí
- ovlivnění teploty z důvodu neznalosti emisivity povrchu
- ovlivnění teploty zapříčiněné nesprávným nastavením hodnoty prostupnosti mezi čidlem a objektem

## Pyrometry

Pyrometry se řadí mezi bezkontaktní teploměry, které k určování teploty tělesa využívají tepelného záření tělesa. Dle rozmezí vlnových délek, jenž jsou pohlcovány snímačem, se pyrometry rozdělí na úhrnné, barvové, pásmové, monochromatické. Využívají se k měření teplot v rozsahu  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Úhrnné pyrometry

Úhrnné pyrometry přijímají tepelné záření vyzařované měřeným tělesem téměř v celém spektru vlnových délek, tzn. od  $\lambda = 0$  do  $\lambda = \infty$ . Vyzařovaný proud záření je zaostřován na snímač za pomoci soustavy čoček nebo zrcadla. Čočky musejí mít velké spektrum prostupnosti a zrcadla velké spektrum odrazivosti. Tělesa, která nemají černou barvu, vyzařují méně energie. Ta je závislá na teplotě, kvalitě a materiálu měřeného povrchu. Jelikož je přesné zjištění emisivity poměrně složité, využívají se tyto pyrometry pro měření teploty těles, jenž se tváří jako černé zářiče nebo se jim alespoň podobají.

### Monochromatické pyrometry

Monochromatické pyrometry jsou zařízení, která porovnávají jas měřeného tělesa s jasnem pyrometrické žárovky. Často se také označují jako jasové. Ke své funkci využívají úzkého spektrálního pásma, nejčastěji při  $\lambda = 65\text{ }\mu\text{m}$ . Ne vždy je měřené těleso černý zářič, proto pyrometr ukazuje skreslenou teplotu, která je vždy nižší než skutečná teplota tělesa. Naměřená teplota se pak koriguje podle speciálních korekčních grafů, které se odvíjejí dle vlnové délky záření a emisivity tělesa. Měření monochromatickými pyrometry je subjektivní, naměřené hodnoty se vždy odvíjejí od obsluhy přístrojů.

### 1.6.3 Termografie

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [10]

Termografie je metoda bezdemontážní diagnostiky, zabývající se rozložením teplotních polí na povrchu měřených objektů. K měření povrchových teplot těles bezdotykovou termografií se využívají termografické kamery (termovize). Termografické kamery pracují na principu analýzy infračerveného záření, jenž je vyzařováno tělesem, v pásmu vlnových délek  $0,4 \mu\text{m} - 25 \mu\text{m}$ . Výstupem z termografické kamery je barevný nebo černobílý termovizní snímek, ze kterého lze zjistit teplotu jednotlivých míst. Přesné určení teploty je poměrně složité, protože naměřená teplota se odvíjí od emisivity tělesa. Za pomoci termografie lze zobrazovat pouze povrchová teplotní pole měřených těles s teplotou od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Základní princip termografie

Termografie je metoda zabývající se zobrazováním a vyhodnocováním povrchových teplotních polí těles. Teplotní pole jsou tvořena sálajícími fotony, které jsou vyzařovanou energií v infračervené části elektromagnetického spektra.

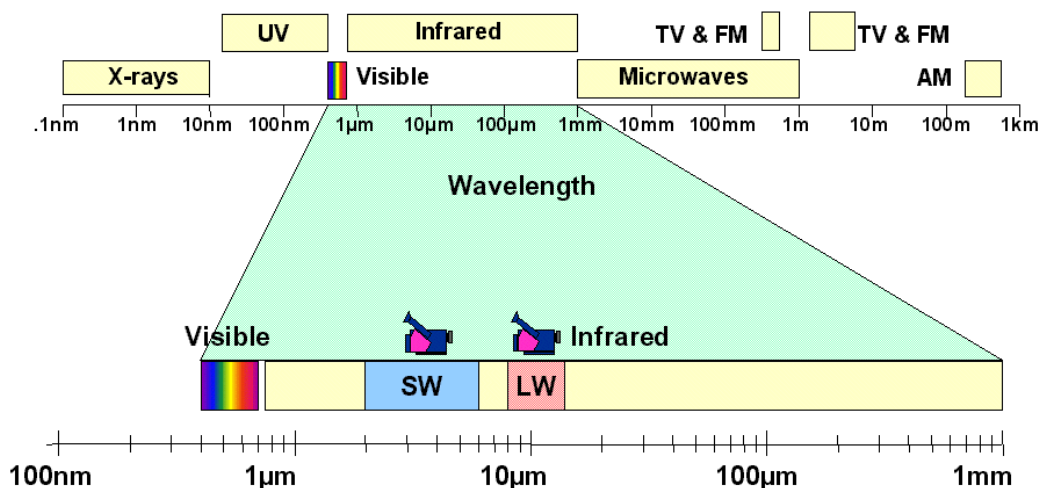
Vyzařovaná energie v infračervené části elektromagnetického spektra může být vytvářena těmito zdroji:

- radiovými zdroji
- tepelnými zdroji
- luminiscenčními zdroji

Tepelným zdrojem je každé těleso, které má teplotu vyšší jak  $0\text{ K}$  (všechny objekty okolo nás). Přenos tepelné energie z tělesa nebo i na těleso se provádí sáláním v infračervené části elektromagnetického spektra. Proudění tepelného záření je představováno prouděním fotonů v infračervené části elektromagnetického spektra. Velikost toku fotonů se odvíjí od teploty tělesa. S rostoucí teplotou tělesa roste i energie toku záření a platí to i obráceně. Infračervené záření je okem neviditelné, je to část elektromagnetického záření o vlnové délce asi  $0,78 \mu\text{m} - 1\text{ mm}$ , projevující se tepelnými účinky. Lidské oko je schopno pozorovat záření o vlnové délce  $0,38 \mu\text{m} - 0,78 \mu\text{m}$ . Oblast infračerveného záření se rozděluje do několika dalších skupin.

Rozdělení infračervené oblasti elektromagnetického spektra dle vlnových délek:

- Blízká oblast - od 0,75  $\mu\text{m}$  do 2  $\mu\text{m}$
- Krátkovlnná oblast - od 2  $\mu\text{m}$  do 3  $\mu\text{m}$
- Střední oblast - od 3  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$
- Vzdálená oblast - od 5  $\mu\text{m}$  do 15  $\mu\text{m}$
- Velmi vzdálená oblast – od 15  $\mu\text{m}$  do 1 mm



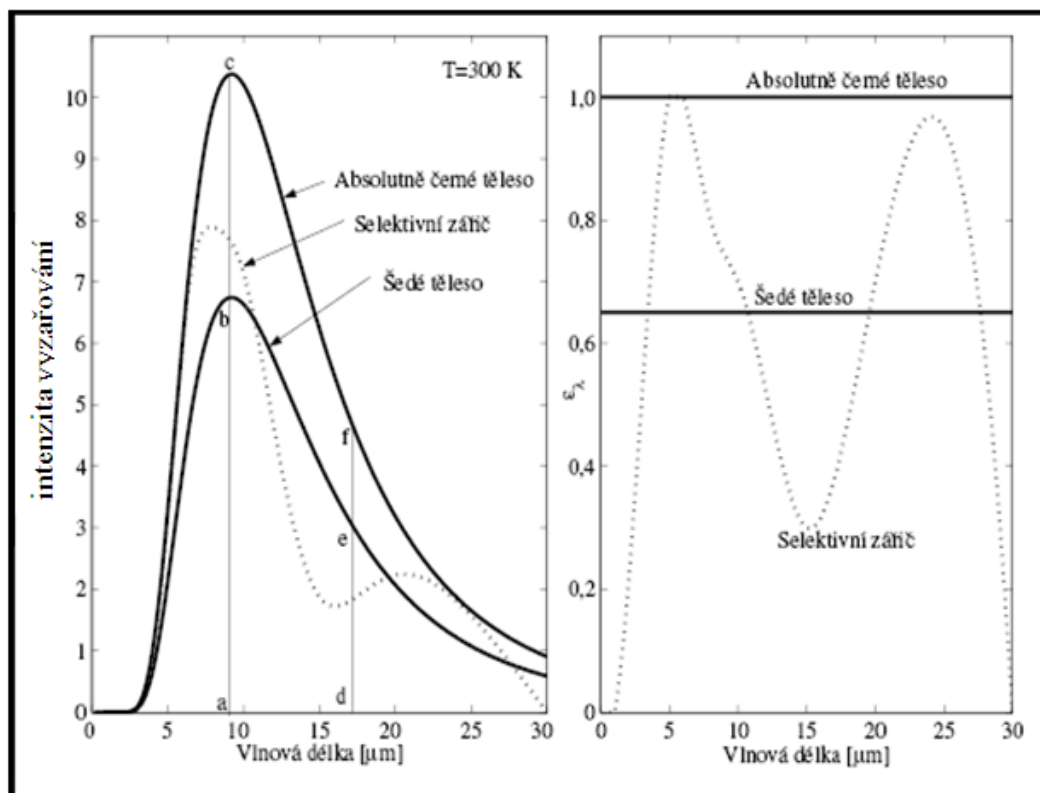
Obr. 1.7 Oblasti elektromagnetického spektra [10]

K výpočtu záření z tělesa se využívá součinitel vyzařování, který bývá označován také jako emisivita  $\varepsilon$ . Emisivita je poměr vyzařovaného záření tělesem k vyzařovanému záření absolutně černého tělesa při stejné teplotě. Koeficient emisivity materiálu je vždy v rozmezí ( $0 < \varepsilon < 1$ ).

Koeficient emisivity  $\varepsilon$  je závislý na:

- Typu materiálu
- Kvalitě povrchu materiálu
- Teplotě zdroje
- Vlnové délce
- Směru vyzařování

Šedá tělesa mají emisivitu  $\varepsilon < 1$ , která je konstantní na všech vlnových délkách. Reálná tělesa, což jsou nejobvyklejší tělesa, mají pro různou vlnovou délku různou emisivitu.



Obr. 1.8 Graf intenzity vyzařování odlišných těles a spektrální emisivitu odlišných těles [10]

## Parametry ke kompenzaci měření

### Emisivita

Emisivita je považována nejdůležitější parametr, jenž musí být při měření správně zadán. Emisivita obvyklých materiálů je v rozmezí od 0,1 do 0,95. Vyleštěné povrchy jako zrcadlo mají emisivitu přibližně 0,1. Emisivita lidské kůže je velmi blízko hodnotě 1. Nekovové materiály mají většinou vysokou emisivitu, která se zvyšující teplotou snižuje. Hodnoty emisivit materiálů jsou uvedeny ve speciálních tabulkách. Nemáme-li k dispozici správnou hodnotu emivity, existuje několik způsobů jak ji správně určit.

## **Zjišťování emisivity**

### **1) Kontaktním měřením**

Zjišťování emisivity se provádí tak, že se nejprve kontaktním způsobem změří teplota určitého místa objektu. Poté se mění na termokameře emisivita do té doby, než se vypočtená teplota shoduje s teplotou, která byla naměřena kontaktním způsobem. Doporučuje se, aby se tento postup znovu opakoval při jiné teplotě tělesa a také aby teplota měřeného objektu byla minimálně o  $10^{\circ}\text{C}$  -  $15^{\circ}\text{C}$  vyšší, než je teplota okolního prostředí. V případě že se emisivita při různých teplotách nemění, je nastavená hodnota správná.

### **2) Referenčním zjištěním**

Zjišťování emisivity referenčním způsobem se provádí tak, že na místo měření se nalepí materiál, jehož emisivitu známe, například černá izolační páska. V dalším kroku se provede bezkontaktní měření teploty na tomto místě. Porovnáním naměřené teploty na překrytém místě s teplotou nejbližšího okolního místa zjistíme rozdíl v naměřených teplotách. Tento rozdíl teplot poté minimalizujeme změnou emisivity v měřicím přístroji.

### **3) Zjištění emisivity spektrometrem**

## **Teplota okolí**

Parametr teploty okolí se využívá ke kompenzaci odraženého záření od tělesa a záření atmosféry mezi termografickou kamerou a tělesem. Záření, které se odráží od zdrojů je ve skutečnosti odrážející se zdánlivá teplota vedlejších míst. Teplota okolí má velký vliv na výslednou naměřenou hodnotu především u těles, jejichž emisivita je nízká nebo nejsou transparentní pro infračervené záření.

Ke zjištění odražené zdánlivé teploty se využívají tyto metody:

- Metoda odrazu
- Přímá metoda

## **Atmosféra**

K ovlivnění naměřené teploty dochází i při průchodu záření atmosférou, proto je nutno ještě respektovat tyto parametry:

- Vzdálenost mezi měřeným tělesem a objektivem termokamery
- Teplotu atmosféry
- Relativní vlhkost

Měření by se nemělo provádět za deště, mlhy a sněžení. Při měření ve venkovních prostorech je doporučováno používat takzvané LW systémy, protože mají menší útlum záření.

## **Měřicí zařízení**

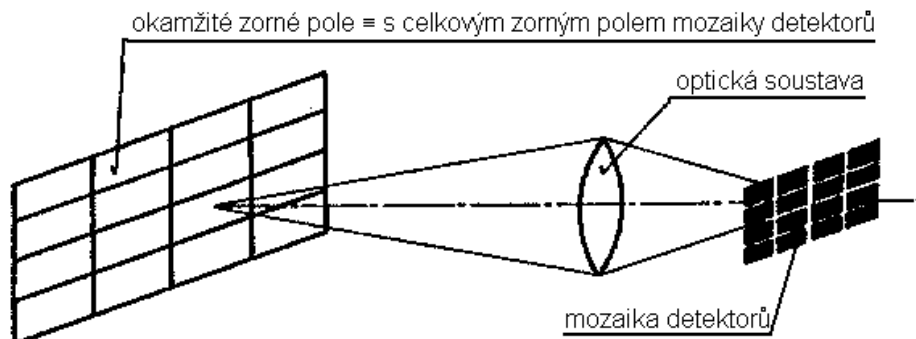
V současné době se používají měřicí zařízení se zabudovaným zobrazovacím systémem. Tyto zařízení jsou schopna vytvářet podrobnější teplotní obraz, který zobrazuje teplotní pole měřených těles, kde všechny izotermální plochy jsou od sebe odlišeny paletou barev, již lze různě měnit. Během měření se kamerou zaznamenávají také záznamy s podmínkami měření. Ty jsou pak potřebné při následovném vyhodnocování termografických snímků. Každý termogram vytvořený termovizní kamerou má na levé straně stupnici, jenž rozděluje rozsah naměřených teplotních hodnot na dílčí intervaly v barevných hladinách.

## **Konstrukční rozdělení termovizních systémů**

Termografické systémy se rozdělují dle spektrálního pásma, ve kterém pracují na LW, MW, SW, NIR systémy. Rozlišuje se také způsob nasazení systému (přenosné a pevné systémy). Dle konstrukčního principu funkce se termovizní systémy dělí na systémy, které mají opticko - mechanický rozklad obrazu nebo systémy s FPA (pole v ohniskové rovině). Existují tři systémy s opticko - mechanickým rozkladem obrazu:

- Systémy s postupným zaváděním vstupní informace a postupným vyhodnocením zavedené informace.

- Systémy se současným zaváděním vstupní informace a současným vyhodnocením zavedené informace
- Systémy se smíšeným zaváděním vstupní informace a současným vyhodnocením zavedené informace.



Obr. 1.9 Princip funkce optického systému s mozaikovým detektorem [10]

## Využívané metody termografie

### Pasivní termografie

Pasivní termografie se nejčastěji využívá k vyobrazování teplotních polí elektrických a mechanických prvků, u nichž je jejich funkce propojena se vznikem nebo pohlcováním tepelné energie v průběhu jejich provozu. Z termografických snímků lze odhalit mechanické opotřebení prvku (zahřívající se ložisko) nebo u elektrických zařízení je možno odhalit nedovolený ohřev zapříčiněný ztrátovým výkonem elektrického proudu (na vinutí elektromotoru, izolátorech, atd.) Pasivní termografie se hojně používá ke sledování technického stavu objektů při preventivní údržbě. Naměřené povrchové teploty na určitých místech jsou porovnávány s teplotami referenčními. Nevýhodou pasivní termografie je, že vlivem turbulence nebo nehomogenní emisivity, může dojít ke špatnému vyhodnocení termogramu.

### Aktivní termografie

Tato metoda termografie je založena na principu řízeného vybuzování tepelných vln v objektu, následovném zjišťování rozložení teplotních polí termokamerou a vyhodnocování signálu. Vady skryté pod povrchem materiálu se projevují rozdíly v rozprostření povrchové teploty. Zdrojem teplotních vln je obvykle vnější zdroj

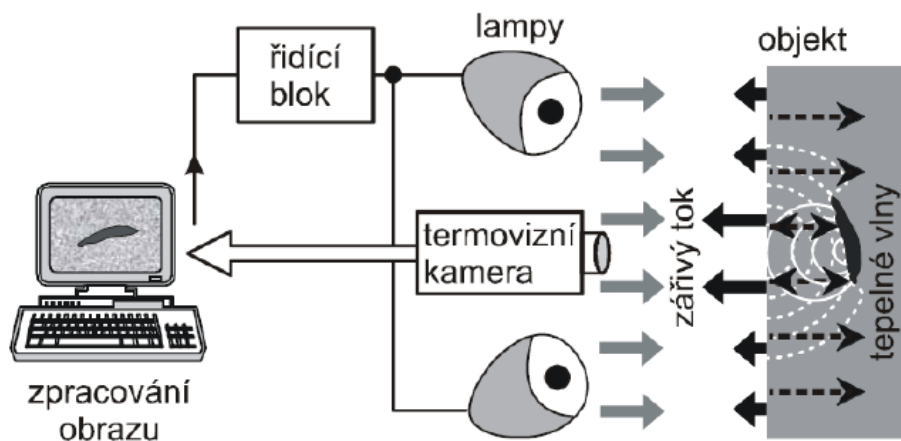
(halogenová lampa, teplý vzduch, laser). Známe-li vlastnosti materiálu, můžeme vyhodnocením termogramu zjistit teoretickou velikost a hloubku vady.

### Pulzní termografie

Základním principem pulzní termografie je pulzní ohřev objektu a vyhodnocení teplotní pole povrchu objektu. Tato metoda se podle rozmístění ohřevu, termokamery a objektu rozděluje na průchodovou a odrazovou. Po pulzní stimulaci, se teplota povrchu rychle mění. Vada v objektu zapříčiní snížení rychlosti rozšiřující se tepelné vlny. Poté lze na teplotním poli podle čela tepelné vlny sledovat místa s odlišnou teplotou. Vady, které se nacházejí ve větší hloubce pod povrchem, se projevují se zpožděním a s nižším kontrastem obrazu. U materiálů s vysokou tepelnou vodivostí (kovy) trvá doba pulzu několik milisekund, zatímco u plastů až několik sekund. Nárůst teploty činí vždy jen pár stupňů, protože ohřev nikdy nesmí těleso poškodit. Nevýhodou této metody je vliv prostředí, emisivity a kmitání tělesa na naměřenou hodnotu.

### Lock-in termografie

Lock-in termografie pracuje na principu modulace řízeného tepelného toku, jenž dopadá na měřené těleso. Tepelná vlna vstupující do tělesa se odráží nazpět k povrchu tělesa v místě, kde nastává změna struktury materiálu. V povrchové vrstvě materiálu dochází ke skládání vyzařovaného a dopadajícího infračerveného záření. Teplotní obrazy zaznamenávané termokamerou jsou modifikovány tepelnou vlnou navracející se z vnitřní struktury tělesa. Rozborem signálu z jednotlivých pixelů kamery lze určit fázový posun odezvy a amplitudu.



Obr. 1.10 Systém aktivní termografie [10]



## **Vibrotermografie**

Tato metoda je založena principu periodického silového namáhání prvku za pomoci budiče kmitů s frekvencí 20-50 Hz. Během průchodu mechanické vlny tělesem dochází vlivem působení vzájemného tření částic materiálu a absorpce energie k přeměně mechanických vln na tepelné vlny, jenž se rozšiřují k povrchu tělesa. V místě vady materiálu dochází ke zvýšení energie tepelných vln a částečnému utlumení mechanických vln. Povrchové teplotní pole je poté zaznamenáváno termokamerou a vyhodnocování se provádí lock-in měřicím systémem.

## **1.7 Vibrodiagnostika**

Vibrodiagnostika patří nejpoužívanější metody technické bezdemontážní diagnostiky. Vyhodnocovacím parametrem k určení technického stavu stroje jsou vibrace. Ty jsou úzce spjaty s dynamickým namáháním stroje, ale také s technickým stavem strojních součástí, nevyvážeností rotačních součástí, opotřebením, únavou materiálu, atd. Vibrace vyvolávají jak rotující tělesa, tak i tělesa s přímočarým pohybem. Vibrace mohou být také zapříčiněny rázy, ke kterým dochází při vzájemném střetu dvou pohybujících se objektů (poškozené součásti ložiska). U harmonických vibrací postačuje zjistit jednu určující veličinu (rychlost, zrychlení výchylku), ostatní veličiny je možno dopočítat. Vibrodiagnostika umožňuje vhodně plánovat nezbytné opravy, zabraňuje vzniku havarijních stavů strojů a snižuje také náklady na údržbu a provoz strojních zařízení.

### **1.7.1 Snímače vibrací**

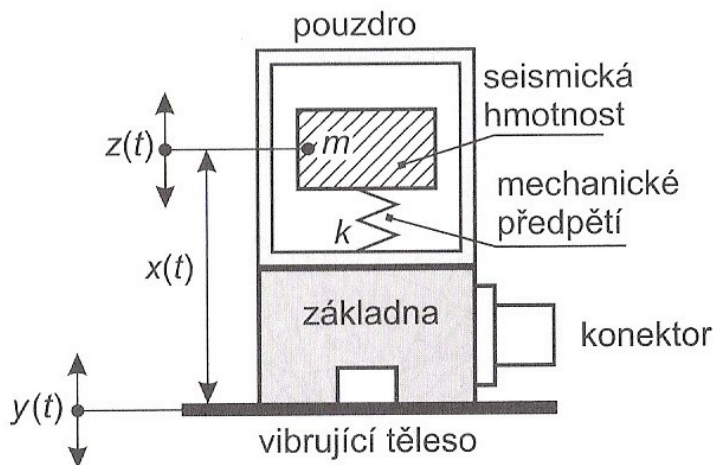
K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [11], [12]

Snímače vibrací se rozdělují do tří skupin dle snímaného parametru. Snímaným parametrem může být zrychlení, výchylka nebo rychlost kmitání. Při snímání vibrací by měl vždy výstupní signál co nejpřesněji odpovídat průběhu vybuzených vibrací.

### **Akcelerometry**

Akcelerometry jsou seismická zařízení vytvářející výstupní signál, který je úměrný vibračnímu zrychlení diagnostikovaného objektu. Akcelerometry jsou považovány za nejvíce používané snímače vibrací. Jejich výstupní signál lze zpracovat na požadovanou

veličinu (výchylku, rychlost, zrychlení). Tyto snímače mohou být realizovány řadou fyzikálních principů (kapacitní, piezorezistivní, piezo-elektrický). K diagnostickým účelům se využívají akcelerometry, které fungují na principu piezoelektrické jevu. Tyto akcelerometry se vyrábějí v různých velikostech a vyznačují se svým velkým dynamickým a frekvenčním rozsahem. Akcelerometry pracující na principu piezoelektrické jevu jsou složeny z mnoha piezoelektrických krystalů, které vytvářejí elektrický náboj, jenž je úměrný působící síle.



Obr. 1.11 Uspořádání akcelerometrů [11]

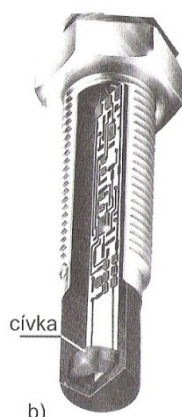
### Snímače rychlosti

Snímače rychlosti patří též mezi seismická zařízení produkující napěťový signál, který je úměrný vibrační rychlosti tělesa. Tyto snímače se upevňují na nerotující strojní součásti. Výstupní signál ze snímače rychlosti je možno integrovat na výchylku vibrací. Snímače rychlosti jsou složeny z pohyblivé cívky, která vlivem působení vibrací kmitá v magnetickém poli magnetu. V současné době se tyto snímače využívají jen v ojedinělých případech, nahradily je akcelerometrické snímače.

### Snímače výchylky, polohy

U těchto snímačů je výstupní signál přímo úměrný relativní výchylce kmitání mezi rotujícími a stacionárními prvky stroje. Tyto snímače mohou být realizovány na kapacitním, indukčním, indukčností a magnetickém principu. Ve vibrační diagnostice se nejvíce využívají indukčnostní snímače, které fungují na principu vířivých proudů. Vysokofrekvenční střídavý elektrický proud procházející cívkou vytváří magnetické pole

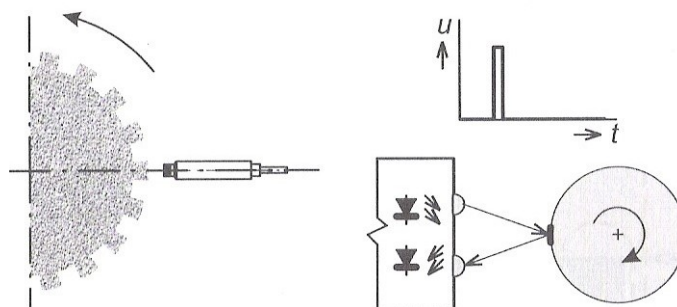
s vysokými frekvencemi. Vloží-li se do vyprodukovaného magnetického pole elektricky vodivé součásti, začnou se v materiálu vytvářet vířivé proudy, které čerpají energii z magnetického pole. Snímače výchylky jsou bezdotykové senzory, které mají v kovovém krytu integrovanou cívku a elektronické obvody. Výhodou této konstrukce je potlačení škodlivých vlivů elektromagnetických polí nacházejících se v okolí. Kmitočtový rozsah je těchto snímačů od 0 Hz – 10 000 Hz.



Obr. 1.12 Snímač výchylky [11]

### Snímače otáček

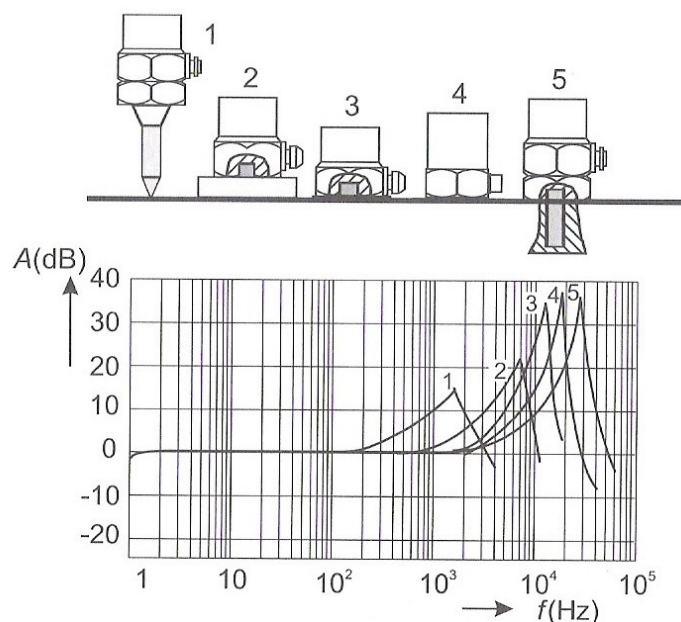
Ve vibrační diagnostice rotačních součástí jsou otáčky hřídelů považovány za jednu z nejdůležitějších měřených veličin. K vyhodnocení číslicového signálu je důležitý takzvaný keyphasor. Keyphasor je vztažný bod, jenž je umístěný na rotující součásti. V současné době jsou nejpoužívanější indukčnostní snímače a optoelektronické snímače. Indukčnostní snímače pracují na principu vířivých proudů, kdy snímač snímá drážky na hřídeli. Optoelektronické snímače mají laserový nebo infračervený paprsek, který se odráží od odrazné plochy, což je základním principem jejich funkce.



Obr. 1.13 Snímače otáček [11]

## Upevnění snímačů

Naměření správných hodnot vibrací je ve velké míře také závislé na správném upevnění snímačů. Při nevhodném připevnění snímače dochází ke zkreslování výstupních hodnot. Způsob připevnění snímačů záleží především na možnostech přístupu a technické uváženosti. Důležité je také správně zvolit velikost snímače. Váha snímače musí být zanedbatelná vůči hmotnosti diagnostikovaného předmětu. Ruční sondu se snímačem lze použít jen při orientačních měření. Nedůležitějším předpokladem pro připevnění snímače magnetem je hladká a feromagnetická plocha diagnostikovaného objektu. Nejvhodnější je připevnění snímače šroubovým spojem, protože nedochází ke snížení rezonanční frekvence vlivem připevnění snímače.



Obr. 1.14 Upevnění snímačů [11]

- 1 - Ruční sonda
- 2 - Připevnění snímače za pomoci ornamentního magnetu
- 3 - Připevnění snímače přes přilepenou kovovou podložku se šroubem
- 4 - Připevnění snímače přímým nalepením k objektu lepidlem nebo včelím voskem
- 5 - Připevnění snímače za pomoci závrtného šroubu

### 1.7.2 Základní metody vibrodiagnostiky

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [11], [12]

Vibrace strojních zařízení mohou být generovány silově, kinematicky nebo také změnou výkonnostních parametrů. Velikost vibrací je dána technickým stavem stroje a mírou opotřebení stroje. Nejpoužívanější metodou vibrodiagnostiky je frekvenční analýza s pomocí FFT.

#### Frekvenční analýza

Základním principem frekvenční analýzy je hledání dějů, které se ve vibračním signálu periodicky opakují. Ty se následovně zobrazí v daném souřadnicovém systému. Je-li využito souřadnicového systému, kde amplituda je na ose y a frekvence je na ose x, poté hovoříme o takzvaném frekvenčním spektru. Jestliže je v souřadnicovém systému amplituda na ose y a čas na ose x, poté se jedná o časový průběh. Přenášená energie je u časového průběhu i frekvenčního spektra stejná. Vibrační signál je u strojů, které pracují s periodickým cyklem rozkládán na velké množství sinusových signálů s náležitou amplitudou a počáteční fází. Frekvenční analýzou lze z vibračního signálu zjistit velké množství informací o technickém stavu a poškození stroje. Dnešní analyzátory využívají k vytvoření frekvenčního spektra rychlou fourierovu transformaci FFT a to z důvodu vysoké rychlosti, přesnosti a snadného nastavení parametrů.

#### Kepstrální analýza

Kepstrální analýza vyhledává pravidelně opakující se děje ve frekvenčním spektru. Kepstrální analýza se využívá v situacích, kdy je frekvenční spektrum složeno z více nosných frekvencí, na nichž jsou ještě namodulována postranní pásma. Odstup postranních pásem je v kepsru poté znázorněn prostřednictvím jednotlivých čar. U kepsru je za velkou výhodu považována jejich velmi malá citlivost na měřící místo. Tato metoda se uplatňuje především při diagnostice ozubených kol a valivých ložisek.

### 1.7.3 Diagnostika valivých ložisek

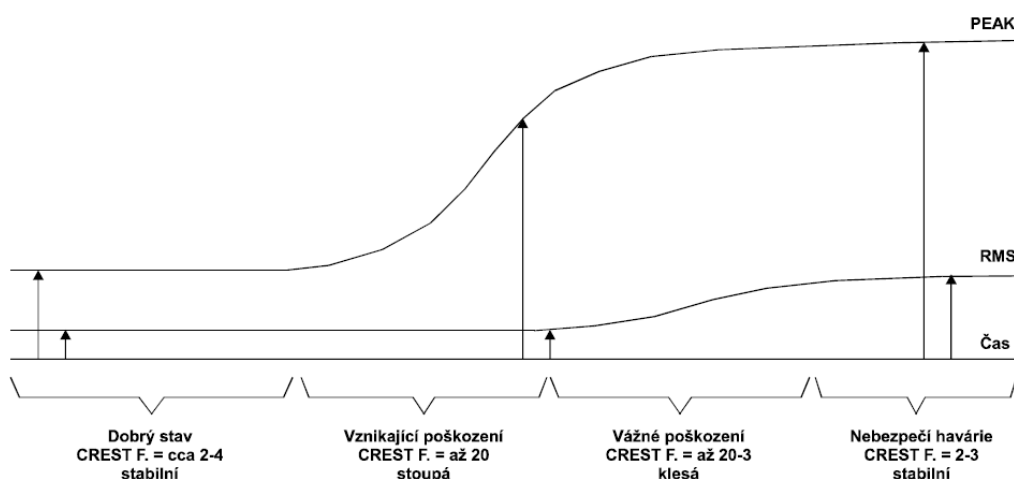
K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [12], [13], [14]

Valivá ložiska jsou nejpoužívanější strojní součásti sloužící k uložení rotujících součástí a k zachycování působících sil. Na správné funkci ložisek závisí bezporuchový chod strojů, přesnost a v neposlední řadě i bezpečnost strojů. Neustálým vývojem konstrukce valivých ložisek se zvyšuje i jejich životnost. Využitím metod technické diagnostiky lze zachytit závady ložisek už v počátečním stádiu. Následovně můžeme provést nápravná opatření, která by vedla k prodloužení jejich životnosti. Vznik poruch valivých ložisek je nejčastěji zapříčiněn špatným mazáním nebo přetížením ložisek.

#### Metody vibrační diagnostiky valivých ložisek

##### Crest factor

Patří mezi nejběžnější metody využívající se k vyhodnocování technického stavu valivých ložisek. Základním principem této metody je měření a porovnávání špičkové a efektivní hodnoty zrychlení vibrací (PEAK/RMS). Z tohoto důvodu není tato metoda závislá na počtu otáček hřídele a typu ložiska. S pomocí této metody lze zachytit ložiskové závady už velmi ranném stádiu. Výhodou metody crest factor je rychlost jejího provedení a finanční nenáročnost.



Obr. 1.15 Vyhodnocení metody crest factor [13]

**Kurtosis faktor**

Metoda kurtosis faktor patří mezi statistické metody sloužící k analýze technického stavu valivých ložisek. Základní myšlenkou je, že nahodilý vibrační signál má normální Gausovo rozdělení (v signálu se neobjevují harmonické a ani žádné jiné pravidelné vysokofrekvenční složky). Určení, zda-li vibrační signál odpovídá normálnímu Gausovu rozdělení, se provede výpočtem dvou určujících parametrů, jenž se označují jako šikmost a špičatost. Ložiska, u kterých se nevyskytuje žádná porucha, mají hodnotu Kurtosis faktoru v rozmezí 3 až 4. Překročí-li hodnota Kurtosis faktoru toto dovolené rozmezí, začnou se u ložiska projevovat první závady.

Stav ložiska odpovídají hodnotě Kurtosis faktoru:

2 až 4 - dobrý stav ložiska

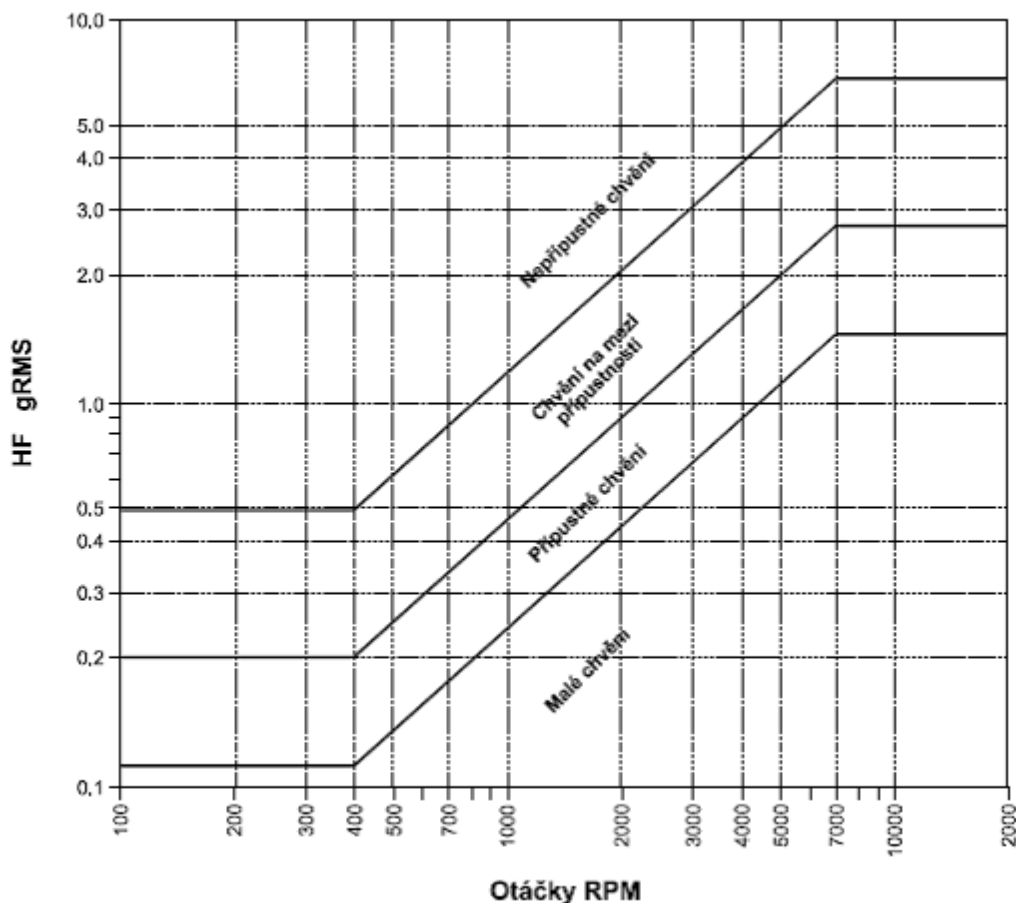
5 až 8 - začínající poškození ložiska

9 až 13 - vážné poškození ložiska

Při hodnotě větší jak 13 hrozí nebezpečí havárie

## Metoda high frequency emission - HF

Tato diagnostická metoda valivých ložisek je založena na poznatku, že se vznikem poškození ložiska dochází ke zvyšování vibrační energie ve vysokých frekvencích. HF parametr je velice choulostivý na poruchy zaviněné špatným mazáním. K vyhodnocení míry závažnosti poškození ložiska se využívá speciální tabulka.



Obr. 1.16 Tabulka závažnosti poškození ložiska [13]

## Obálková analýza (envelope)

Obálková analýza je metoda, s jejíž pomocí lze odhalit nejenom poškození ložiska. Při současném využití FFT analýzy můžeme i určit, která z komponent valivého ložiska je poškozená (vnitřní kroužek, vnější kroužek, klec, valivá tělíska). Jelikož má každá komponenta ložiska svou relativní rychlost vůči hřídeli, proto můžeme určit poruchové frekvence jednotlivých komponent. Základním principem obálkové analýzy je snímání rázových impulsů, jenž se generují při přejezdu valivého elementu přes poškozené místo.



Poruchová frekvence vnitřního kroužku BPFO

$$f = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta\right) \quad (5)$$

Poruchová frekvence vnějšího kroužku BPFI

$$f = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta\right) \quad (6)$$

Poruchová frekvence kuličky nebo válečku BSF

$$f = \frac{PD}{2BD} \cdot f_r \cdot \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta\right)^2\right) \quad (7)$$

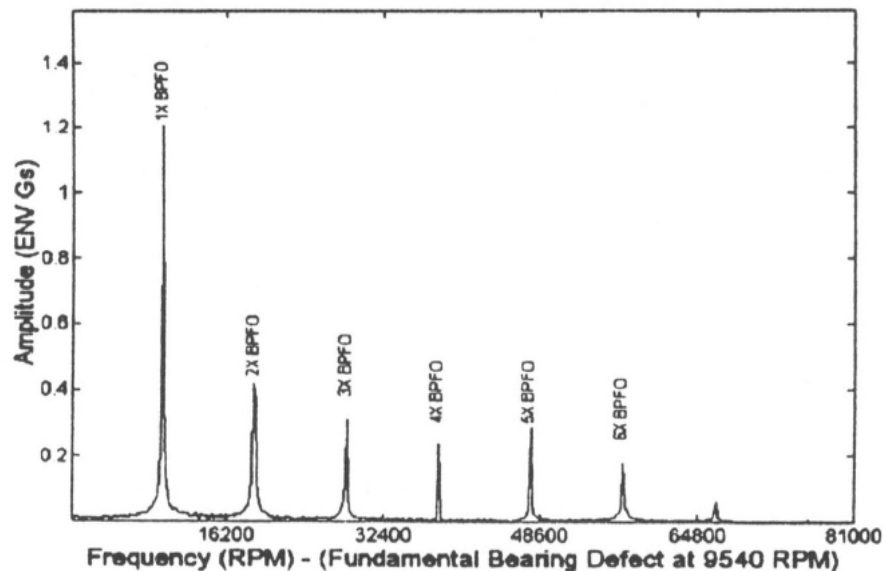
Poruchová frekvence klece

$$f = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta\right) \quad (8)$$

kde:

$n$  - počet kuliček popřípadě válečků

$f_r$  - frekvence, která je daná relativními otáčkami vnitřního a vnějšího kroužku



Obr.1.17 Ukázka obálkového spektra vibrací vnějšího kroužku valivého ložiska [12]

### Metoda SEE (spectral emitted energy)

SEE metoda je založena na principu snímání akustické emise ložiska ve frekvenčním pásmu (150 – 500 kHz). Tato ultrazvuková akustická emise se generuje při poškození jednotlivých částí ložiska. Akustická emise může vznikat i při nedostatečném mazání ložiska, mikroprokluzování a kavitaci kapalin. Ke snímání akustické emise se využívají speciální senzory, jenž jsou vytvořeny ze širokopásmového akcelerometru a SEE senzoru.

### 1.7.4 Diagnostika čerpadel

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [2], [12]

U hydrodynamických čerpadel je čerpaná kapalina přinucována k obtékání profilu lopatek. Následkem je rychle měnící se směr dopravované kapaliny, jenž je závislý na aktuálním pootočení oběžného kola. Následkem popsané změny rychlosti kapaliny je vznik tlakových rázů na vstupní hrany lopatek oběžných kol. Tyto tlakové rázy vytvářejí v dopravované kapalině tlakové vlny, které dynamicky zatěžují činné části čerpadel. Od vzniklého dynamické zatížení se generují vibrace rotujících a nerotujících částí čerpadel, jenž závisejí na otáčkách hřídele čerpadla.

U hydrodynamických čerpadel se monofrekvenční složky vibrací rotorových a satorových částí vyskytují na takzvané frekvenci míjení. Tyto složky jsou obsaženy téměř ve všech spektrech vibrací hydrodynamických čerpadel.

$$f_m = i \cdot z_k \cdot f_n \quad i \in (1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

kde:

$f_m$  - frekvence míjení

$z_k$  - počet otáček

$f_n$  - otáčková frekvence rotoru

$i$  - vyšší harmonické

Nastane-li u nově zrepasovaného čerpadla zvětšování amplitud vibrací na frekvenci míjení  $f_m$ , poté se může jednat o závadu vlivem excentrické polohy rotoru vůči poloze satoru. U čerpadel, která již delší dobu v provozu může nárůst těchto amplitud vibrací znamenat uvolnění rozváděcího kola v čerpadle. Dojde-li v průběhu provozu čerpadla k rychlému zvýšení těchto amplitud vibrací, je nutné co nejrychleji udělat revizi čerpadla. Trendováním těchto složek vibrací lze pozorovat nárůst skuliny mezi výstupem z oběžného kola čerpadla a vstupem rozváděcího kola čerpadla.

U hydrodynamických čerpadel může také nastat stav, kdy jsou některé lopatky oběžného kola v zákrytu s lopatkami rozváděcího kola. Tento stav se pravidelně opakuje a dochází k vytváření tlakových impulsů působících na satorové a rotorové části čerpadla. Frekvence těchto vibrací se označuje jako  $f_{sim}$

$$f_{sim} = \frac{z_k \cdot z_{hk} \cdot f_n}{K} \quad (10)$$

Kde:

$f_{sim}$  - frekvence skupinové interakce mříží

$z_k$  - počet lopatek oběžného kola

$z_{hk}$  - počet lopatek rozváděcího kola

$f_n$  - otáčková frekvence rotoru

$K$  - nejmenší společný dělitel  $z_k$  a  $z_{hk}$

### Kavitace (vylučování vzduchu)

Kavitace je jev, kdy v čerpané kapalině při poklesu tlaku na mez odpovídající napětí syté páry, vznikají mikrobublínky naplněné parou a vyloučeným vzduchem, později nastává imploze těchto bublinek. Tento jev je doprovázen tvrdými rázy a údery na malé plochy materiálu. Následkem je obrovské místní namáhání materiálu, kdy dochází k porušování hloubkovému porušování stěn jednotlivých částí čerpadla.

U kavitace platí:

- Mikrobublina se vytváří v případech, kde tlak klesl na hranici tlaku syté páry.
- Mikrobublina se zvětšuje, je-li tlak menší nebo roven tlaku syté páry
- Zánik mikrobublíny je trochu rychlejší než její vznik.

Kavitace způsobuje tyto nepříznivé jevy:

- Zvýšený hluk čerpadla
- Snížení účinnosti čerpadla
- Poškození kapalinou smáčených povrchů čerpadla

U čerpadel se kavitace ve frekvenčním spektru projeví nárůstem širokého pásma amplitud vibrací ve frekvenční oblasti  $f \in (0,3; 2)$  kHz. Je-li u čerpadla s valivými ložisky podezření, že vzniká kavitace, mělo by se kromě obvyklého měření vibrací začít využívat ještě speciálních měřících metod valivých ložisek. A to z důvodu, že poškození ložiska v počátcích vyvolává stejné širokopásmové odezvy jako čerpadlo zasažené kavitací.

## **Turbulence u čerpadel**

Turbulence můžou u čerpadel vytvářet vysokofrekvenční tlakové pulzace. Obvykle ale turbulence vyvolávají tlakové pulzace o nízké frekvenci. Horní hranicí frekvencí vibrací a pulzací u čerpadel je otáčková frekvence  $f_n$ . Turbulence u čerpadel projevují zvýšením hlučnosti.

### **1.7.5 Diagnostika elektromotorů**

K tvorbě této kapitoly bylo využito literatury [12]

U elektromotorů mohou vznikat tyto tři druhy vibrací:

- vibrace způsobené mechanickým příčinou
- vibrace způsobené elektromagnetickým příčinou
- vibrace způsobené ventilací

Celkové vibrace elektromotoru jsou složeny ze všech těchto druhů vibrací. Všeobecně lze říci, že poruchy se u elektromotorů mohou objevovat ve vinutí statoru a rotoru, magnetickém obvodu a také v mechanických částech motoru (ložiska, hřídele, atd.)

#### **Vibrace způsobené elektromagnetickou příčinou**

Vibrace v elektrických obvodech mohou být způsobeny nárůstem přechodových odporů, nedovoleným zahříváním vinutí, zkratů mezi závity, poškozeným vinutím a také snížením izolačních vlastností vinutí. Vibrace v magnetických obvodech mohou být zapříčiněny uvolněním rotorových plechů nebo zkratů mezi samostatnými plechy.

#### **Vibrace způsobené mechanickou příčinou**

Mechanickou příčinou vzniku vibrací může být nevyváženost rotoru elektromotoru, nesouosost způsobená špatným ustavením čerpadla a elektrického motoru, špatný stav valivých ložisek. Všechny tyto poruchy lze diagnostikou odhalit za chodu stroje.

Všechny zmiňované poruchy se kromě nárůstů vibrací mohou také projevat zvýšenou hlučností, velkým zahříváním jednotlivých součástí elektromotorů popřípadě zmenšeným krouticím momentem, při jmenovitých parametrech stroje.

## 2 Charakteristika společnosti koksovna Svoboda

K tvorbě této kapitoly bylo využito odkazu [15]

Společnost koksovna Svoboda vznikla v roce 1908. Její původní název byl koksovna František, ten byl pozdějších letech ještě několikrát pozměněn. Klíčovým výrobním produktem podniku Koksovna Svoboda je koks, což je surovina nutná k výrobě železa. Koks se využívá v chemickém průmyslu a je vytvářen pyrolýzou černého uhlí při teplotách vyšších jak 1000 °C se zamezeným přístupem vzduchu. Při výrobě koksu vznikají i vedlejší produkty jako čpavek, síra, koksárenský plyn, benzol, dehet. V současnosti má koksovna Svoboda čtyři koksárenské baterie, které mají dohromady 210 komor o celkové kapacitě 16 000 kg koksu. Kompletní výrobní proces koksu trvá zhruba 34 hodin.



*Obr. 2.1 Podnik koksovna Svoboda*



*Obr. 2.2 Doprava koksu v podniku*

### 3 Aplikace metod technické diagnostiky v praxi

Tato kapitola se zabývá aplikací metod technické diagnostiky u horizontálních čerpadel ve společnosti koksovna Svoboda. Ke zjišťování technického stavu horizontálních čerpadel bylo využito metod vibrační diagnostiky a termografie. Diagnostická měření byla prováděna v pravidelných časových intervalech na všech funkčně důležitých místech čerpacího soustrojí. Měření vibrací se prováděla ve všech třech směrech (vertikální, horizontální a axiální). Tato diagnostikovaná horizontální čerpadla se využívají k dopravě vody a oleje.

#### 3.1 Popis použitých měřících zařízení

K měření vibrací čerpacího soustrojí bylo využito měřícího analyzátoru A4400 - VA4Pro od firmy Adash. K analyzátoru byly připojeny dva akcelerometrické snímače vibrací A102-1A pro snímání vibrací ve vertikálním a horizontálním směru a jeden akcelerometrický snímač s označením A104 - 1A k snímání vibrací ve směru axiálním. Všechny zmiňované akcelerometry mají ve své konstrukci zabudovaný silný magnet sloužící k připevnění snímačů na soustrojí. Vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno v programu DDS 2007 od firmy Adash.



Obr. 3.1 Analyzátor A4400 VA4Pro





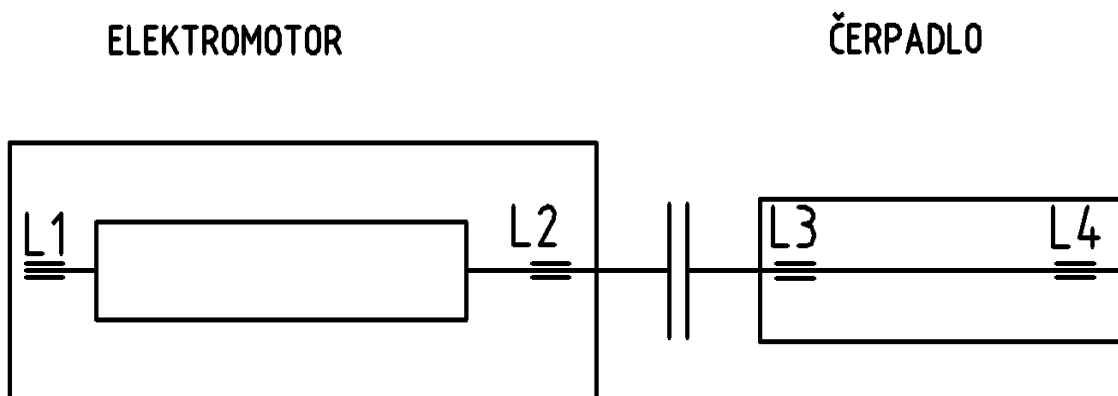
*Obr. 3.2 Akcelerometry Adash*

Ke snímání teplotních polí jednotlivých prvků čerpacího soustrojí bylo využito termovizní kamery Ti32 od firmy Fluke s teplotním rozsahem  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tato termokamera je vybavena technologií IR – fusion, jenž dovoluje prolínání termosnímku s optickým snímkem a následovné uložení obrazu s rozlišením  $640 \times 480$  pixelů. K analyzování naměřených termosnímků bylo využito programu SmartWiew.



*Obr. 3.3 Termovizní kamera Ti 32 Fluke [16]*

### 3.2 Schéma diagnostikovaného čerpacího soustrojí



*Obr. 3.4 Schéma čerpacích soustrojí*

### 3.3 Popis diagnostikovaného čerpacího soustrojí

#### Elektromotor

Pohon čerpacích zařízení zajišťuje 3 fázový asynchronní elektromotor. Asynchronní elektromotory jsou nejrozšířenějším pohonem čerpadel. Otáčky tohoto typu motorů jsou závislé na frekvenci sítě ale i na zátěži motoru. Výhodou těchto motorů je jejich vysoká spolehlivost, která je dána nenáročnou konstrukcí. Nevýhodou asynchronních elektromotorů je jejich vysoká citlivost na kolísání elektrického napětí v síti.



*Obr. 3.5 Elektromotor čerpacího soustrojí Č.2*

**Horizontální odstředivé čerpadlo:**

*Obr. 3.6 Čerpadlo čerpacího soustrojí Č.1*

**3.4 Volba umístění měřících míst na čerpacím zařízení**

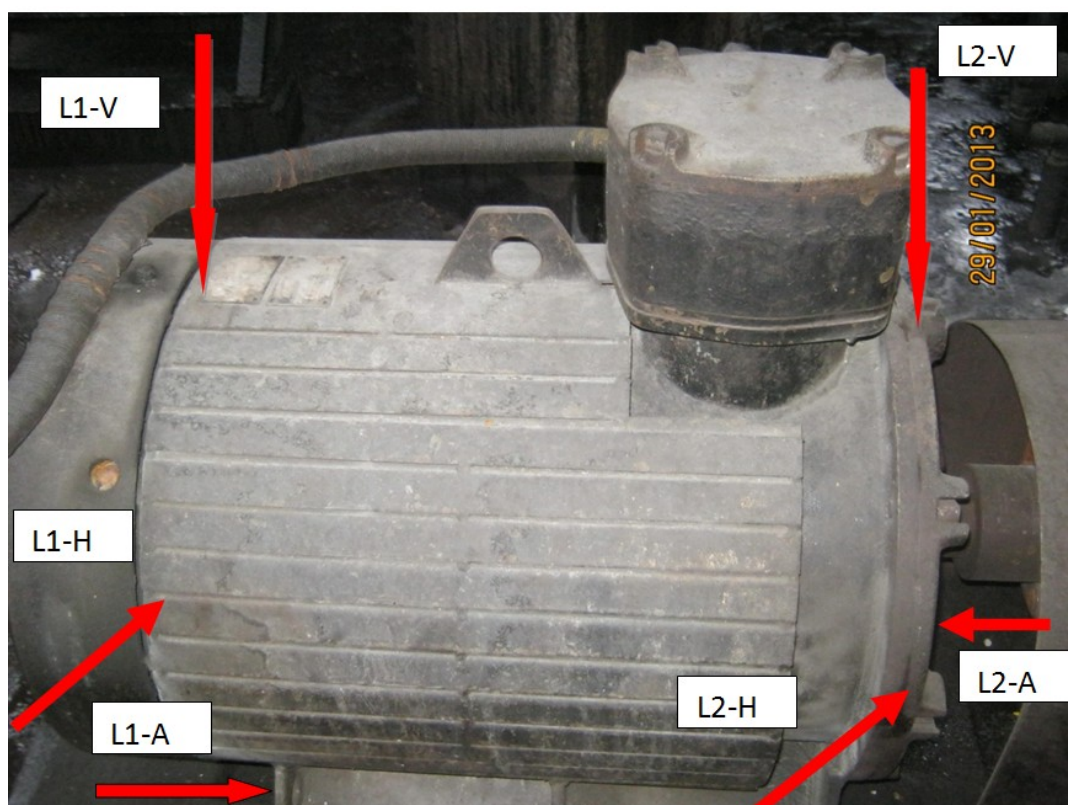
Senzory ke snímání vibrací diagnostikovaných objektů je doporučováno umísťovat podle platné normy ČSN ISO 113371-1. U námi diagnostikovaných objektů byly senzory vibrací vždy umísťovány na předem označených místech a to z důvodu, aby nenastávaly chyby v měření vlivem změny umístění snímacího senzoru. Jelikož u diagnostikovaného čerpacího zařízení byl dobrý přístup k jednotlivým prvkům zařízení, mohli jsme uskutečnit měření ve všech třech směrech. U většiny čerpacích soustrojí jsme měření vibrací prováděli na čtyřech místech, jen u velikých dvou venkovních čerpadel jsme proměřovali pět míst, jak je naznačeno na následujícím obrázku. L1 až L5 jsou hlavní ložiska u soustrojí, kde ložiska L1 a L2 jsou ložiska na elektromotoru a L3 až L4 popřípadě L5 jsou ložiska umístěna v čerpadle.

Označení měřících směrů:

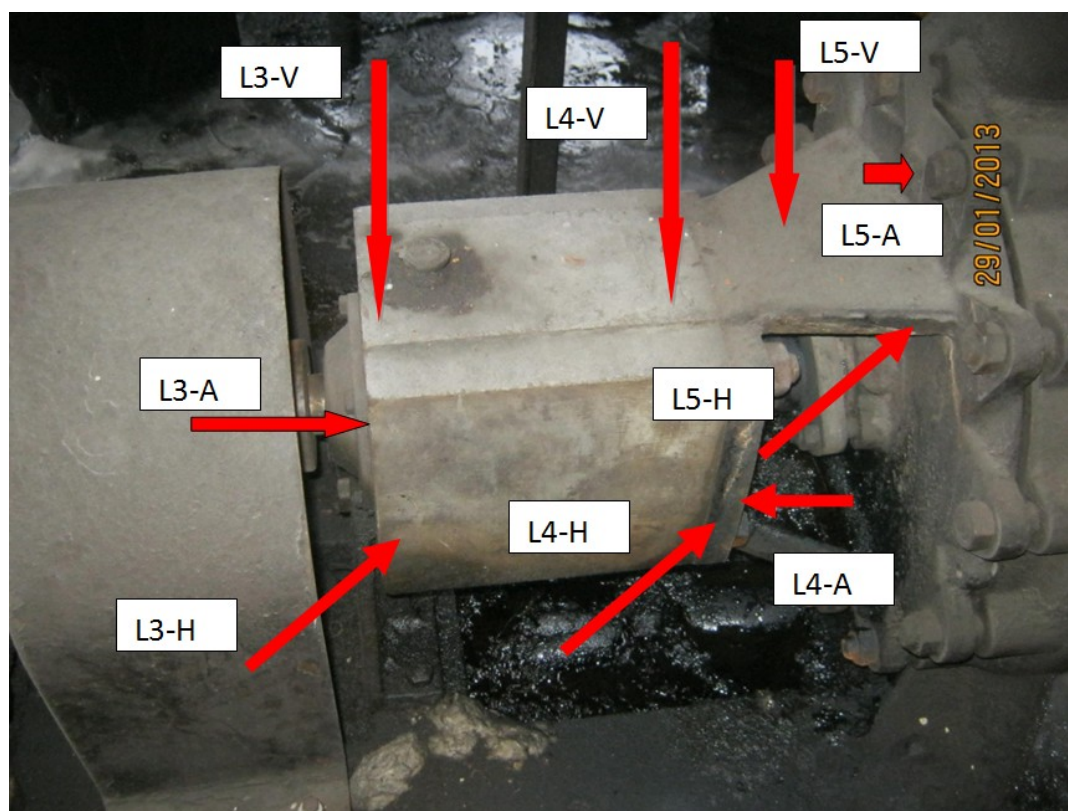
Horizontální měřící směr – H

Axiální měří směr - A

Vertikální měřící směr – V



Obr. 3.7 Zobrazení měřicích míst na elektromotoru

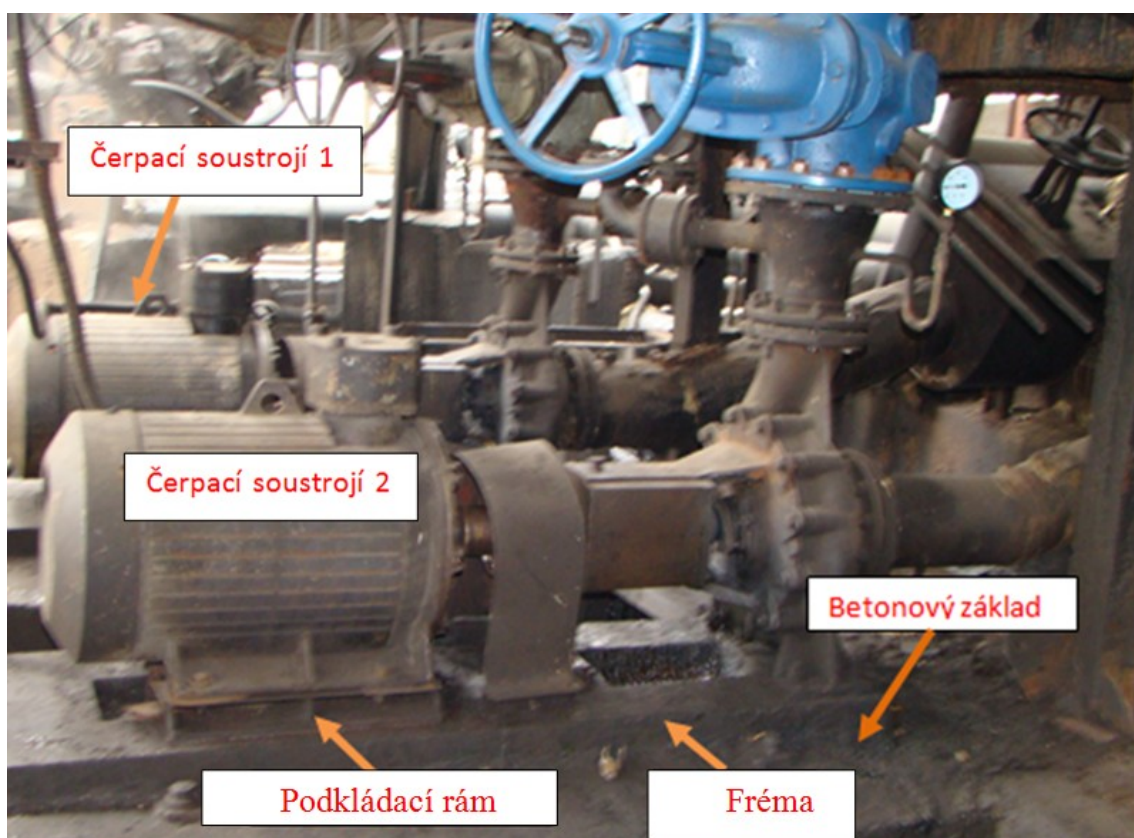


Obr. 3.8 Zobrazení měřicích míst na čerpadle

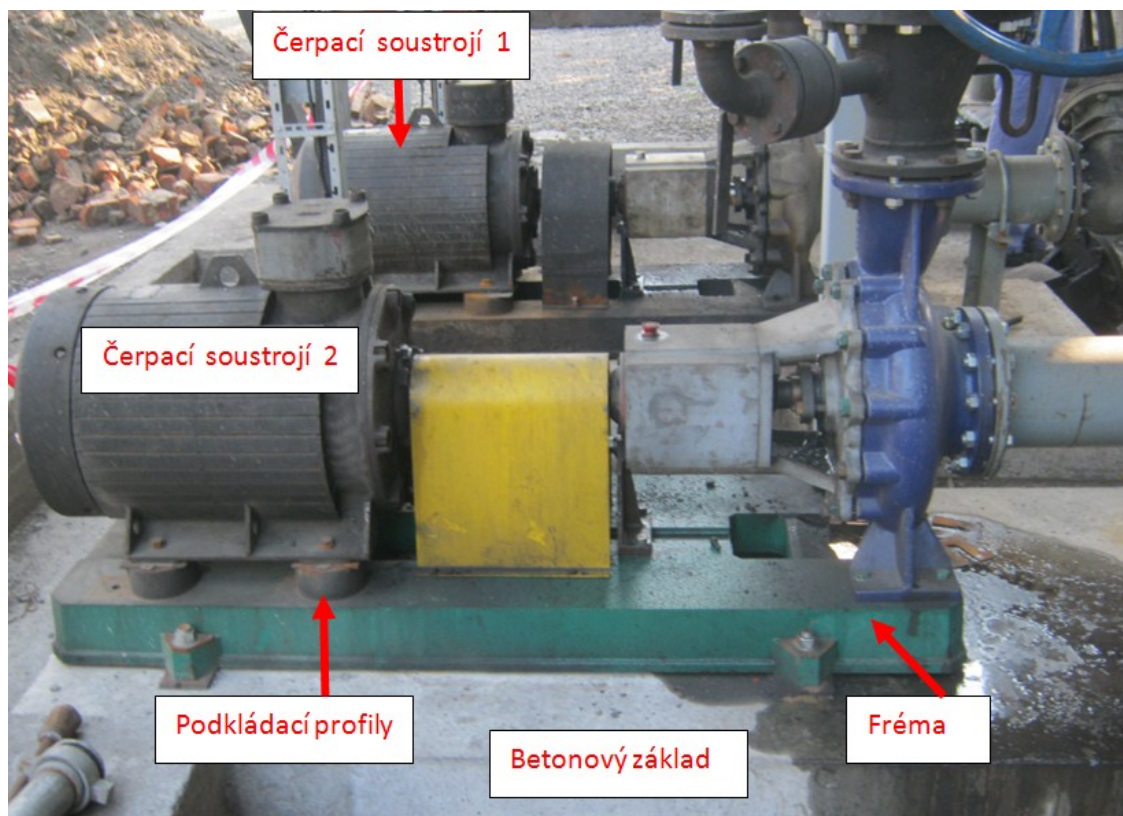


### 3.5 Diagnostika venkovních čerpadel

Na venkovním stanovišti v podniku koksovna Svoboda se nacházejí dvě čerpací soustavy, které se využívají k čerpání vody. Tato čerpadla jsou napojena společné potrubí a v provozu je obvykle jen jedno čerpadlo. Druhé čerpadlo se využívá jako rezervní, v případě poruchy prvního čerpadla. Na mohutném betonovém základu je upevněna ocelová fréma, na kterou se přímo upevňuje elektromotor. Jelikož v minulosti byla provedena výměna elektromotoru za motor s jinými připevňovacími parametry, musel být nový motor vypodložen speciálním rámem a to z důvodu zachování stejné osové výšky výstupního hřídele. Tento podkládací rám byl k původní frémě přivařen a nový motor k němu přišroubován. Vzhledem ke špatnému stavu betonového základu a podkládacího rámu byly v průběhu našeho měření vybudovány nové základy a podkládací rám nahrazen plnými ocelovými profily. Tato oprava měla zajistit snížení naměřených vibrací.



Obr. 3.9 Pohled na čerpací soustrojí na venkovním stanovišti před opravou



Obr. 3.10 Pohled na čerpací soustrojí na venkovním stanovišti po celkové opravě

Tab. 3.1 Parametry elektromotoru u čerpacího soustrojí Č.1 a Č.2

Výrobce	MEZ Frenštát pod Radhoštěm
Typ	Asynchronní 3 ~
Výkon	55 kW
Otáčky	$1475 \text{ min}^{-1}$
Frekvence	50Hz
Otáčková frekvence	24,5Hz

### 3.5.1 Měření mohutnosti vibrací venkovních čerpacích soustrojí

K tvorbě této kapitoly bylo využito odkazu [17], [18]

Měření mohutnosti vibrací je ve skutečnosti měření efektivní hodnoty zrychlení nebo rychlosti vibrací (RMS) ve frekvenčním pásmu 10 - 1000 Hz. Naměřené efektivní hodnoty rychlosti vibrací u námi diagnostikovaných čerpacích zařízení (na elektromotorech) jsme

vyhodnocovali dle normy ČSN ISO 10816 - 3. Tato norma je rozdělena do několika skupin a platí i pro strojní zařízení poháněná elektrickým motorem s výkonem od 15 kW do 300 kW – v normě skupina 2. Diagnostikované soustrojí má tuhý základ. Vyhodnocení mohutnosti vibrací čerpadel jsme prováděli dle normy 10816 - 7, což je norma pro vyhodnocování odstředivých čerpadel.

ČSN ISO 10816-3			
DRUH ULOŽENÍ	HRANICE PÁSMO	EFEKTIVNÍ HODNOTA VÝCHYLKY [μm]	EFEKTIVNÍ HODNOTA RYCHLOSTI [mm/s]
TUHÉ	A/B	22	1.4
	B/C	45	2.8
	C/D	71	4.5
PRUŽNÉ	A/B	37	2.3
	B/C	71	4.5
	C/D	113	7.1

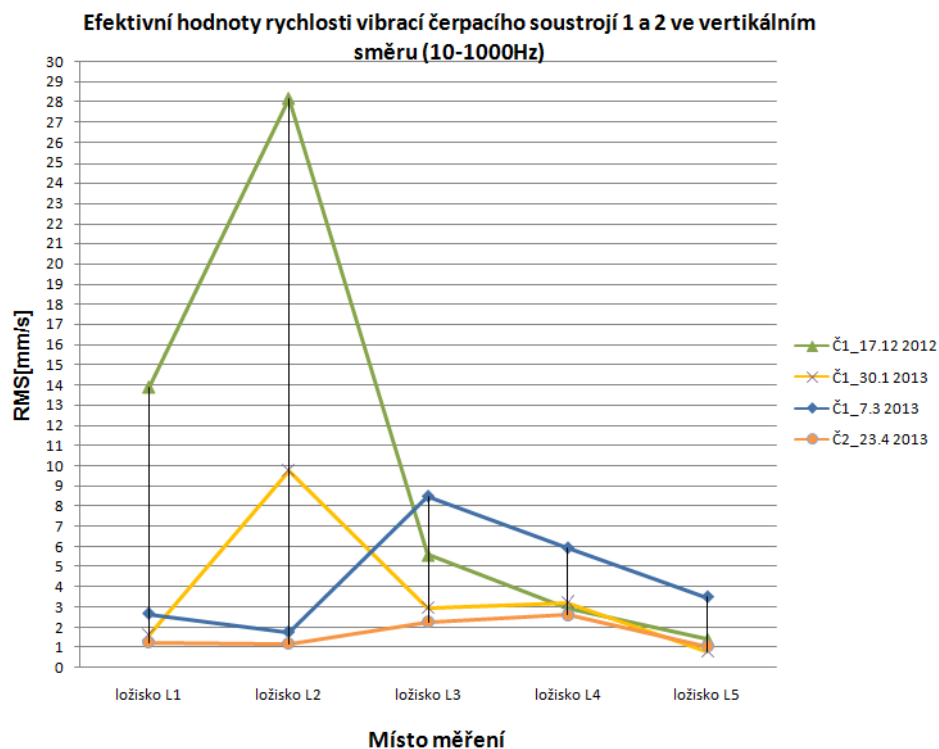
Obr. 3.11 Pásmo mohutnosti vibrací podle normy ČSN ISO 10816 – 3

ČSN ISO 10816-7			
	HRANICE PÁSMO	EFEKTIVNÍ HODNOTA VÝCHYLKY [μm]	EFEKTIVNÍ HODNOTA RYCHLOSTI [mm/s]
ČERPADLA S VYŽADOVANOU VYSOKOU SPOLEHLIVOSTÍ BEZPEČNOSTÍ A POHOTOVOSTÍ	A/B	50	2.5
	B/C	80	4
	C/D	130	6.5

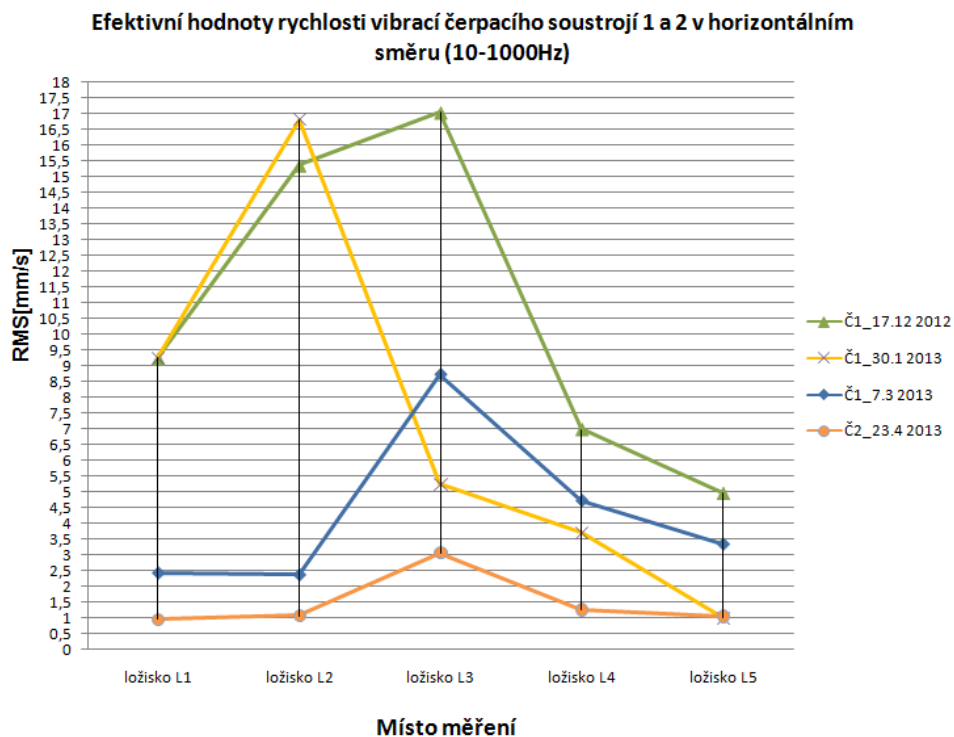
Obr. 3.12 Pásmo mohutnosti vibrací podle normy ČSN ISO 10816 – 7

Vyhodnocovací pásma vibrací:

- A** - Pásmo vibrací pro nové stroje
- B** - Stroje nacházející se v pásmu B mají neomezeně dlouhý provoz
- C** - Stroje nacházející se v pásmu C mají omezený provoz
- D** - U strojů z pásma D může vlivem vibrací nastat poškození stroje

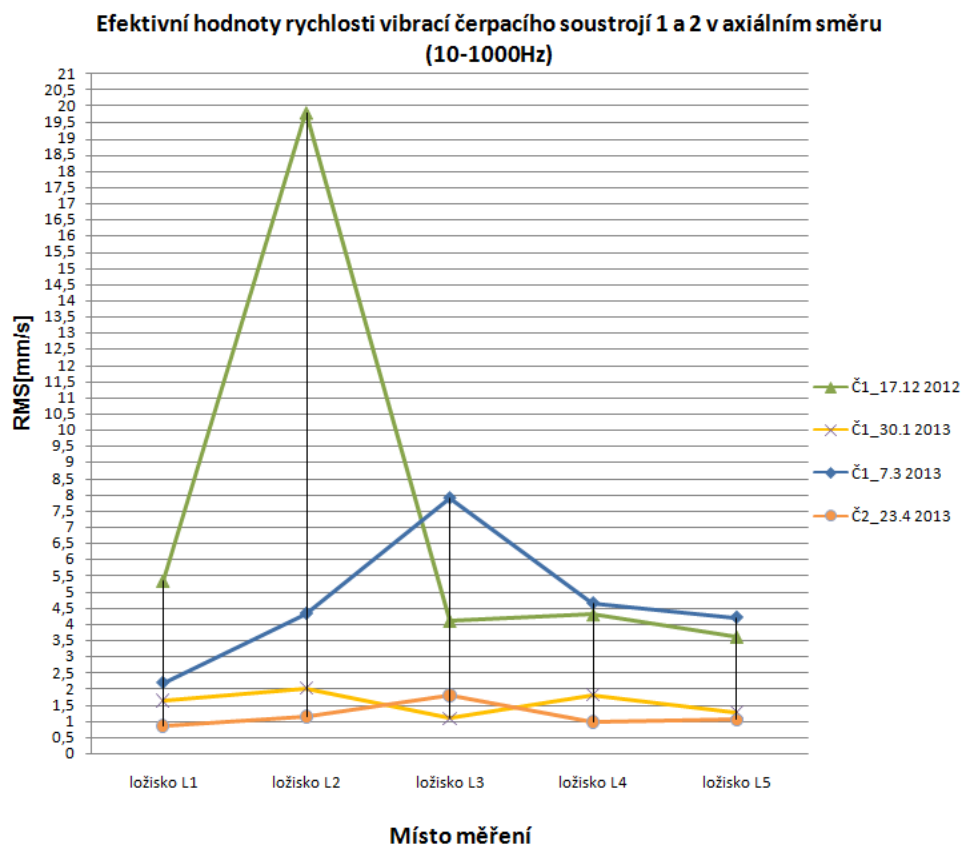


Obr. 3.13 Vývoj efektivních hodnot rychlosti vibrací u čerpacího soustrojí Č.1 a Č.2 ve vertikálním směru

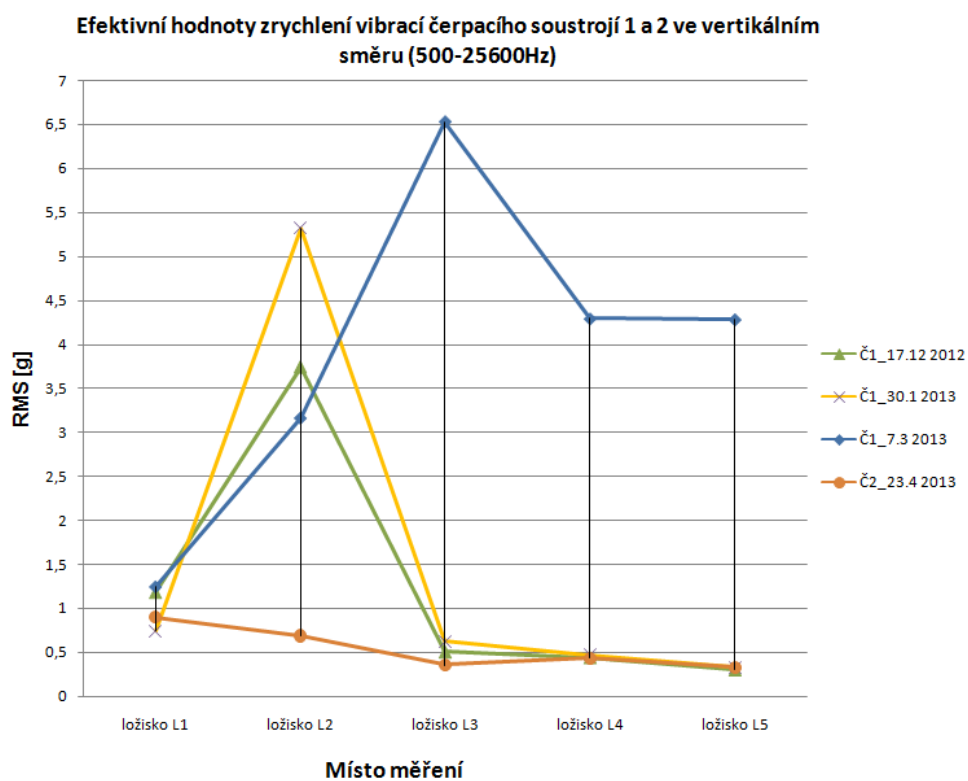


Obr. 3.14 Vývoj efektivních hodnot rychlosti vibrací u čerpacího soustrojí Č.1 a Č.2 v horizontálním směru

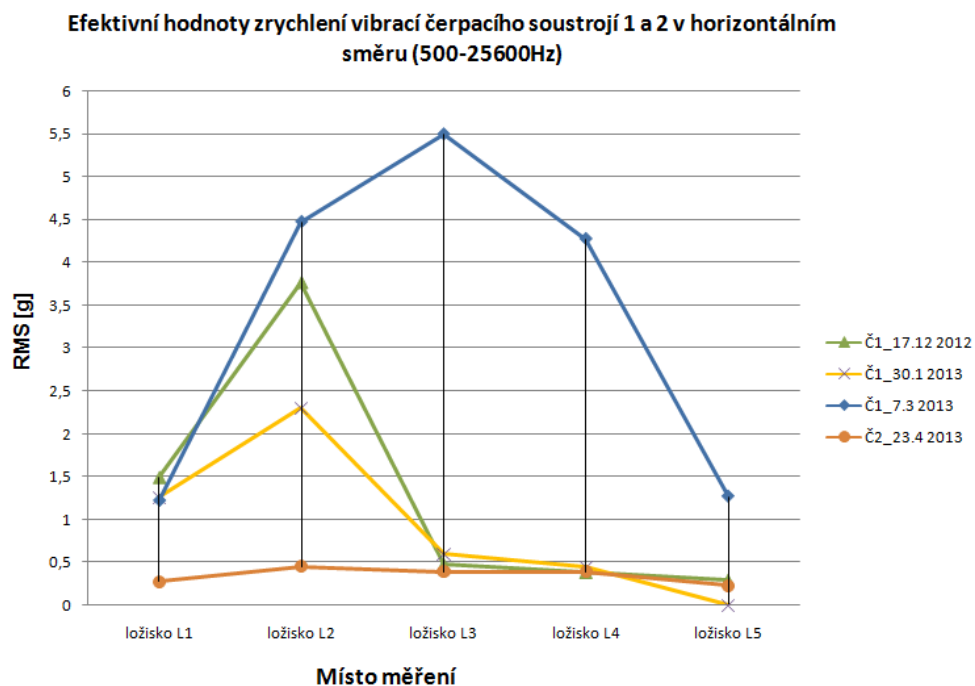




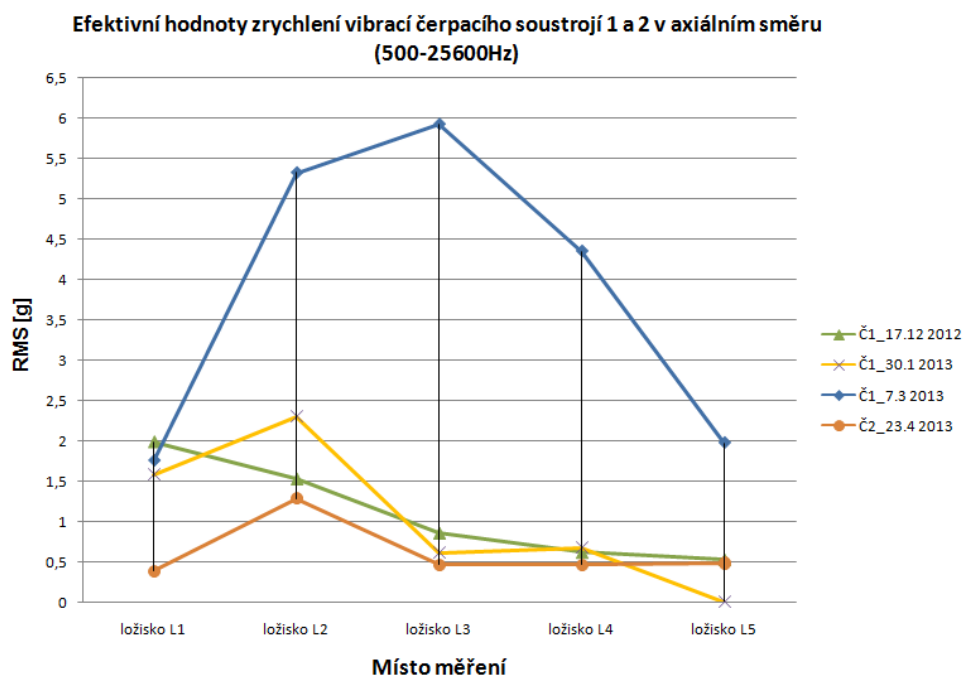
Obr. 3.15 Vývoj efektivních hodnot rychlosti vibrací u čerpacího soustrojí Č.1 a Č.2  
v axiálním směru



Obr. 3.16 Vývoj efektivních hodnot zrychlení vibrací u čerpacího soustrojí Č.1 a Č.2  
ve vertikálním směru



Obr. 3.17 Vývoj efektivních hodnot zrychlení vibrací u čerpacího soustrojí Č.1 a Č.2 v horizontálním směru



Obr. 3.18 Vývoj efektivních hodnot zrychlení vibrací u čerpacího soustrojí Č.1 a Č.2 v axiálním směru

## Vyhodnocení mohutnosti vibrací čerpacího soustrojí 1 a 2

### Čerpací soustrojí Č.1

Před vybudováním nového betonového základu a výměnou spojky byla u čerpacího soustrojí číslo 1 naměřena největší efektivní hodnota rychlosti vibrací na elektromotoru v místě L2-V (vertikální směr) a na čerpadle v měřicím bodě L3-H (horizontální směr). Hodnota RMS v bodě L2-V byla 28,2 mm/s. Tato hodnota několikanásobně převyšuje povolenou hodnotu v normě ČSN ISO 10816 – 3, stroj tedy patří do pásma D a může u něj nastat poškození vlivem vibrací. Na čerpadle v bodě L3-H byla naměřena hodnota 17 mm/s. Tato hodnota také patří do pásma D a u stroje může také nastat poškození vlivem nadměrných vibrací.

Po výměně spojky, vybudování nového betonového základu a ustavení čerpacího soustrojí došlo k poklesu efektivních hodnoty vibrací. Nejvyšší efektivní hodnota rychlosti vibrací byla diagnostikována v místě L2-A a v místě L3-H. V měřicím místě L2-A byla naměřena hodnota 4,3 mm/s. Tato hodnota spadá podle normy ČSN ISO 10816 - 3 do pásma C. Stroje v tomto pásmu mají omezený provoz. Na čerpadle v místě L3-H byla poté naměřena hodnota 8,7 mm/s. Dle normy ČSN ISO 10816 - 7 čerpadlo patří do skupiny D.

Po opravě čerpacího zařízení vzrostly efektivní hodnoty zrychlení vibrací téměř ve všech diagnostikovaných bodech. V některých bodech hodnota vibrací vzrostla i mnohanásobně oproti naměřeným hodnotám před opravou. Tento nárůst efektivních hodnot zrychlení vibrací byl zapříčiněn vývojem ložiskových závad.

Efektivní hodnoty zrychlení vibrací nás informují o technickém stavu ložisek. Například u ložiska L3-V je efektivní hodnota zrychlení vibrací 6,5 g. Takto vysoká hodnota upozorňuje na vysoké opotřebení ložiska a v brzké době nastane havárie ložiska.

### Čerpací soustrojí Č.2

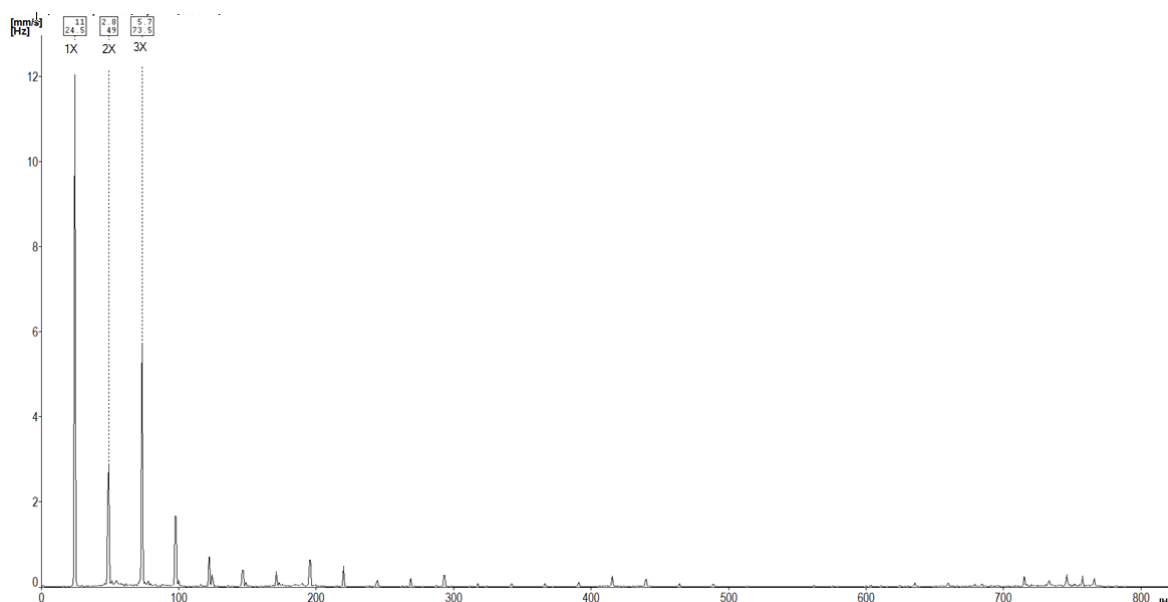
U čerpacího soustrojí číslo 2 byla nejvyšší efektivní hodnota rychlosti vibrací naměřena na elektromotoru v místě L1-V a u čerpadla v místě L3-H. Naměřená hodnota RMS na elektromotoru byla v místě L1-V 1,2 mm/s. Dle normy ČSN ISO 10816 - 3 patří tento elektromotor do pásma A, což je pásmo pro nové stroje. Naměřená hodnota RMS u tohoto čerpadla v místě L3-H byla 3 mm/s. Po vyhodnocení dle normy ČSN ISO 10816 - 7 jsme zjistili, že čerpadlo patří do pásma B, což je pásmo pro stroje s neomezeně dlouhým provozem.

Efektivní hodnoty zrychlení vibrací nabývají u tohoto soustrojí ve všech měřených místech poměrně nízkých hodnot. To znamená, že ložiska jsou v dobrém technickém stavu a nehrozí u nich destrukce.

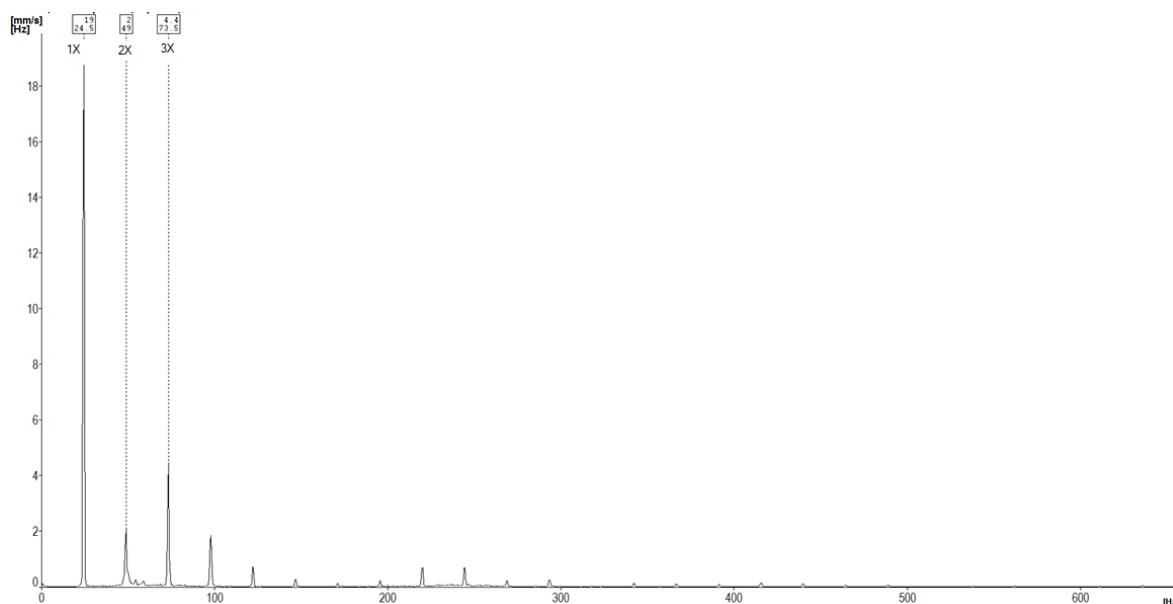
### 3.5.2 Vyhodnocení frekvenčních spekter rychlosti vibrací venkovních čerpacích soustrojí

Frekvenční spektra rychlosti vibrací byla zaznamenána v pásmu 1- 12800 Hz. K určení poruch soustrojí z naměřených spekter vibrací bylo využito ilustrovaných Berryho tabulek. Frekvenční spektra byla zaznamenána a vyhodnocena ve všech třech měřicích směrech. U čerpacího zařízení Č.1 byla vyhodnocena frekvenční spektra z měření ze dne 17.12 2012 (před opravou) a porovnána s naměřenými frekvenčními spektry z již opraveného soustrojí ze dne 7.3 2013.

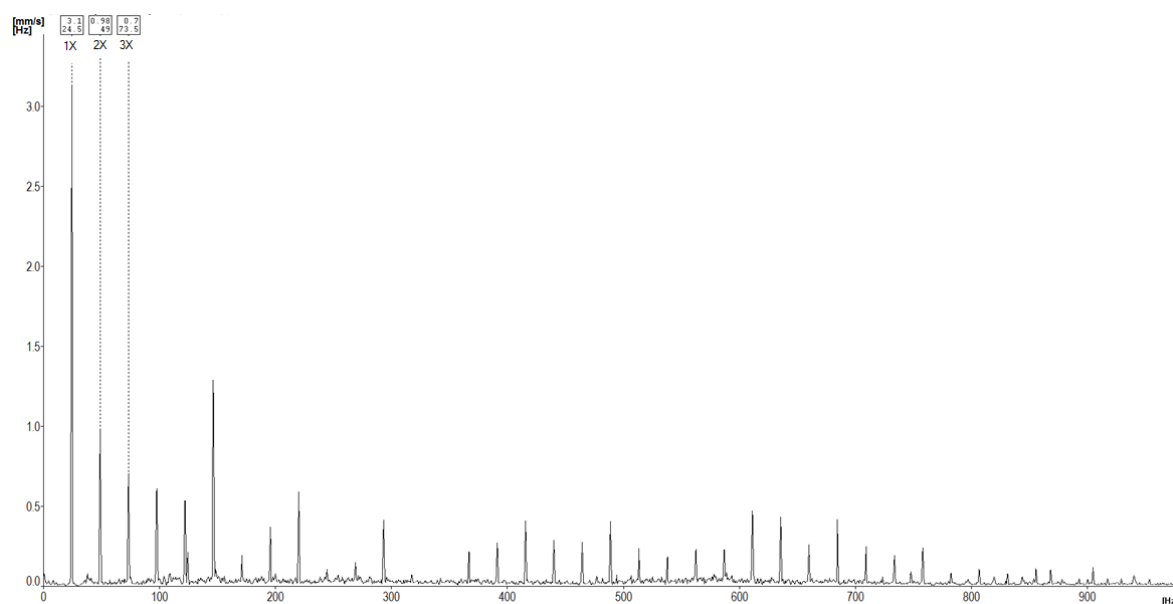
**Vyhodnocení frekvenčních spekter rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č.1 před opravou:**



*Obr. 3.19 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č.1. v místě L1-V (vertikální směr) 17.12 2012*



*Obr. 3.20 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č1. v místě L2-A  
(axiální směr) 17.12 2012*



*Obr. 3.21 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č1. v místě L3-A  
(axiální směr) 17.12 2012*

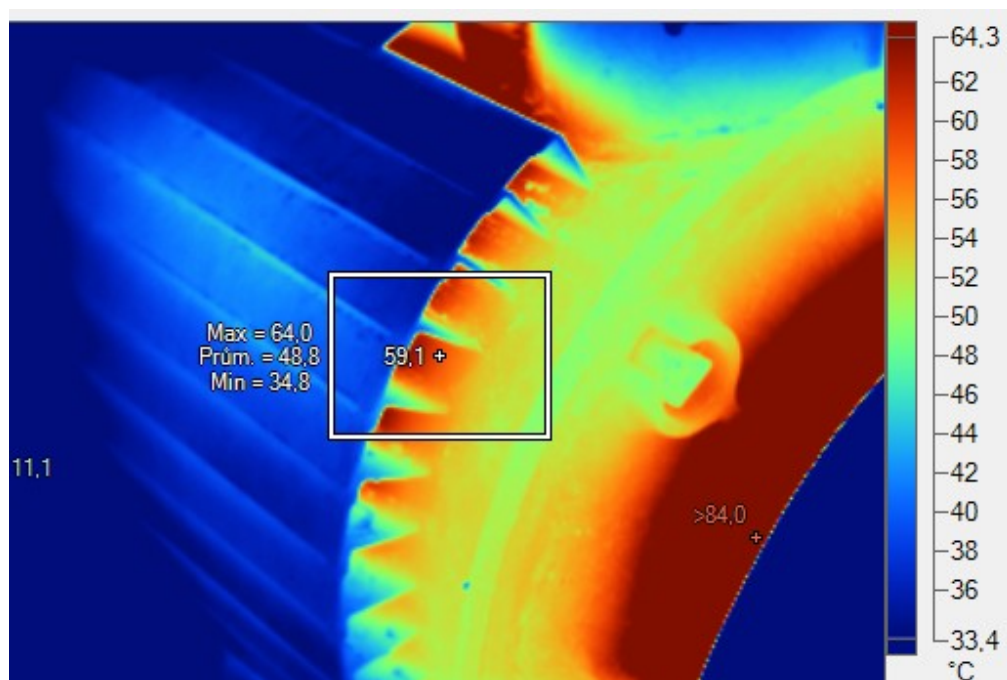
Ve všech naměřených frekvenčních spektrech rychlosti vibrací u čerpacího soustrojí Č.1 se objevují špičky na první otáčkové frekvenci hřídele elektromotoru (24,4 Hz) a na harmonických násobcích této frekvence. Amplitudy vibrací na první otáčkové frekvenci jsou velmi vysoké, zatímco na harmonických násobcích této frekvence jsou amplitudy

vibrací několikrát menší. Všechny tyto příznaky, jenž se objevují ve frekvenčním spektru, mohou upozorňovat na nevyváženost stroje, nebo mechanické uvolnění.

Po důkladné vizuální prohlídce soustrojí jsme našli praskliny na svařovaném rámu, který sloužil k vypodložení elektromotoru. Tyto praskliny poté výrazně snížily tuhost podkladacího rámu. Následkem snížené tuhosti rámu byl nárůst rychlosti vibrací. Mezi další příčiny vzniku vysokých vibrací u soustrojí patří špatné ustavení soustrojí, ale i zhoršený technický stav spojky.



*Obr. 3.23 Poškozená spojka před opravou soustrojí*



*Obr. 3.24 Termosnímek elektromotoru Č.1\_17.12 2012*





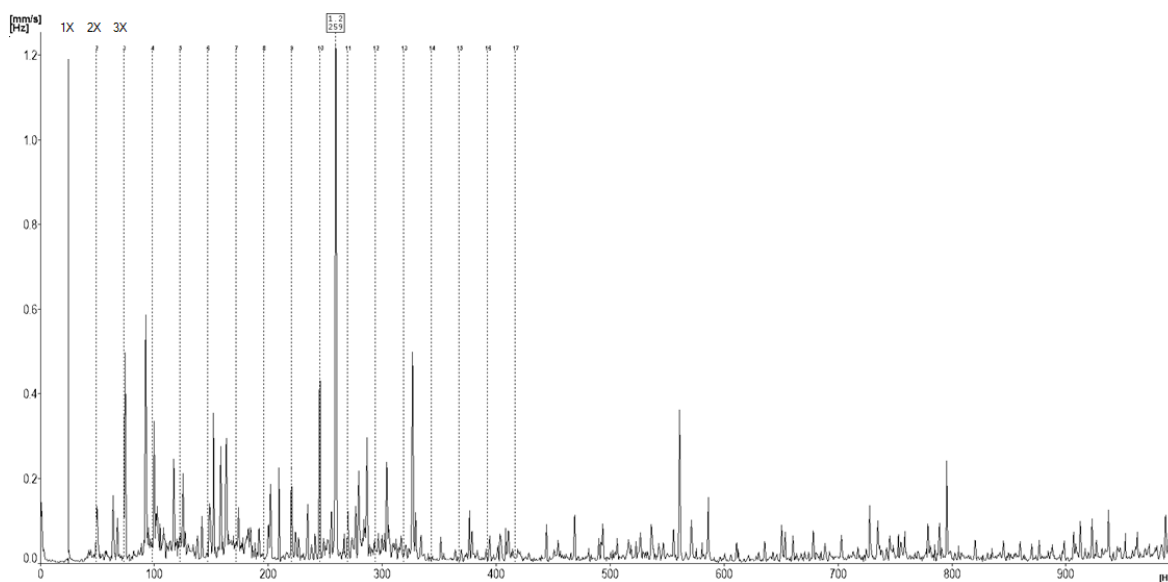
*Obr. 3.25 Zavařený starý podkládací rám*



*Obr. 3.26 Způsob ustavení a připevnění elektromotoru ke starému podkládacímu rámu*

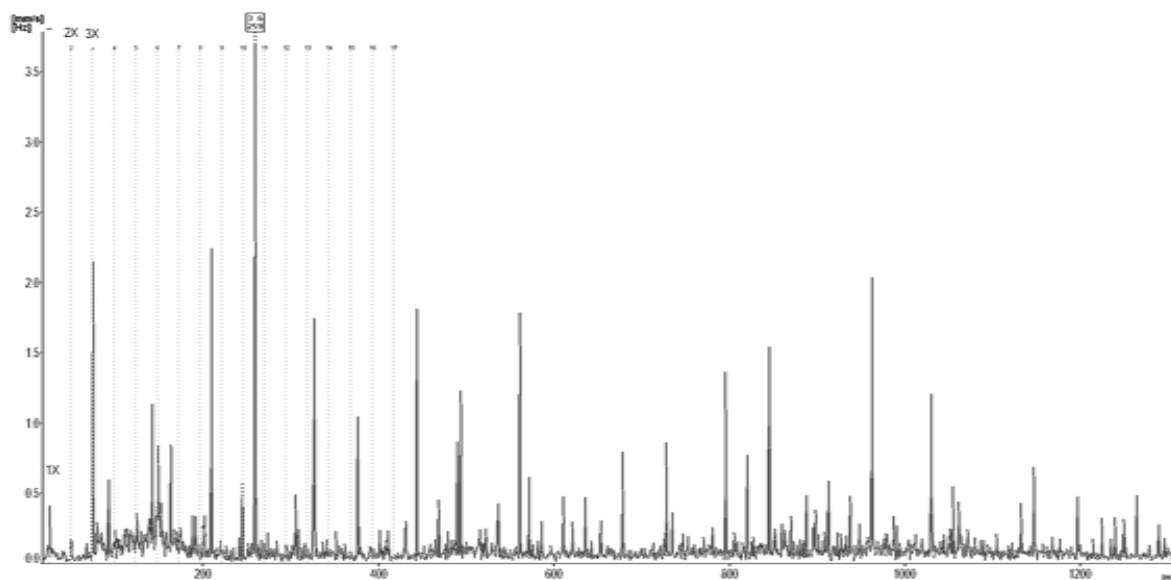
## Vyhodnocení frekvenčních spekter rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č.1 po opravě:

Po opravě čerpacího soustrojí Č.1, tzn. po vybudování nového betonového základu, výměně spojky, nahrazení vypodložovacího rámu motoru plnými ocelovými profily a ustavení soustrojí vymizely z frekvenčních spekter vibrací vysoké amplitudy vibrací, jenž byly především zapříčiněny nízkou tuhostí vypodložovacího rámu. Jelikož při opravě soustrojí nebyly u jednotlivých strojů vyměněny ložiska, začaly se ve frekvenčních spektrech objevovat menší amplitudy rychlosti vibrací na poruchových frekvencích ložisek. Dále se frekvenčních spektrech vyskytují nízké špičky na 1x, 2x, 3x otáčkové frekvenci hřídele. Špičky na těchto frekvencích upozorňují na výskyt mechanického uvolnění u soustrojí. Při kontrole soustrojí jsme narazili na povolené matice u kotvicích šroubů frémy. Jelikož pod maticemi nebyly pružné podložky, matice se vlivem vibrací samovolně povolily. Další problém, který u soustrojí způsoboval zvýšené vibrace, byla nevhodně ukotvená fréma k betonovému základu. Fréma byla podložena čtyřmi ocelovými podložkami a v ostatních místech byla mezi frémou a betonovým základem vzduchová mezera. Toto upevnění frémy výrazně snížilo tuhost celé soustavy.

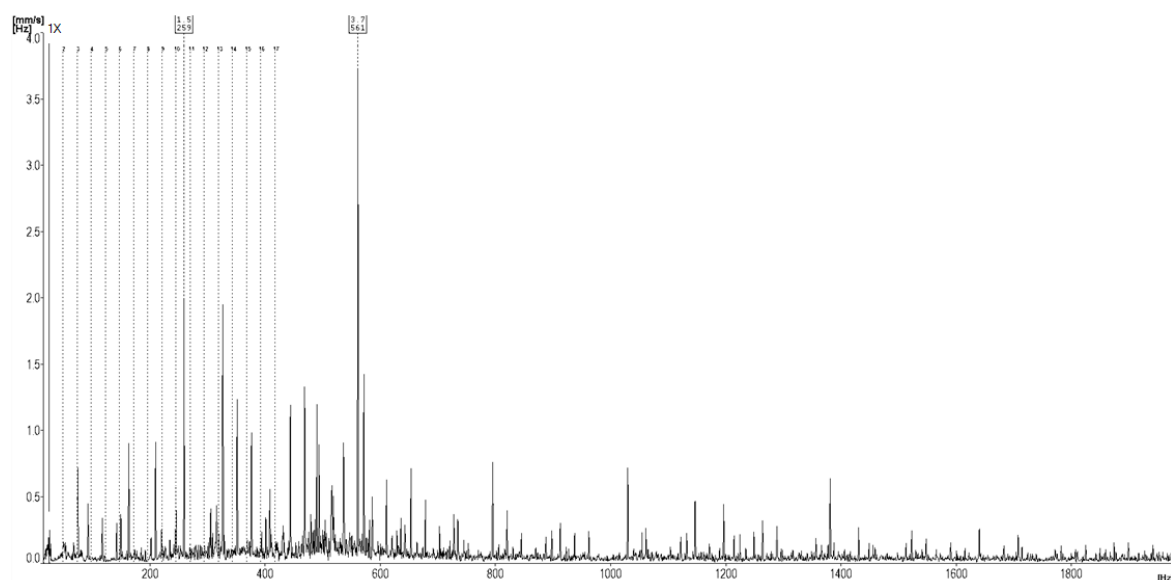


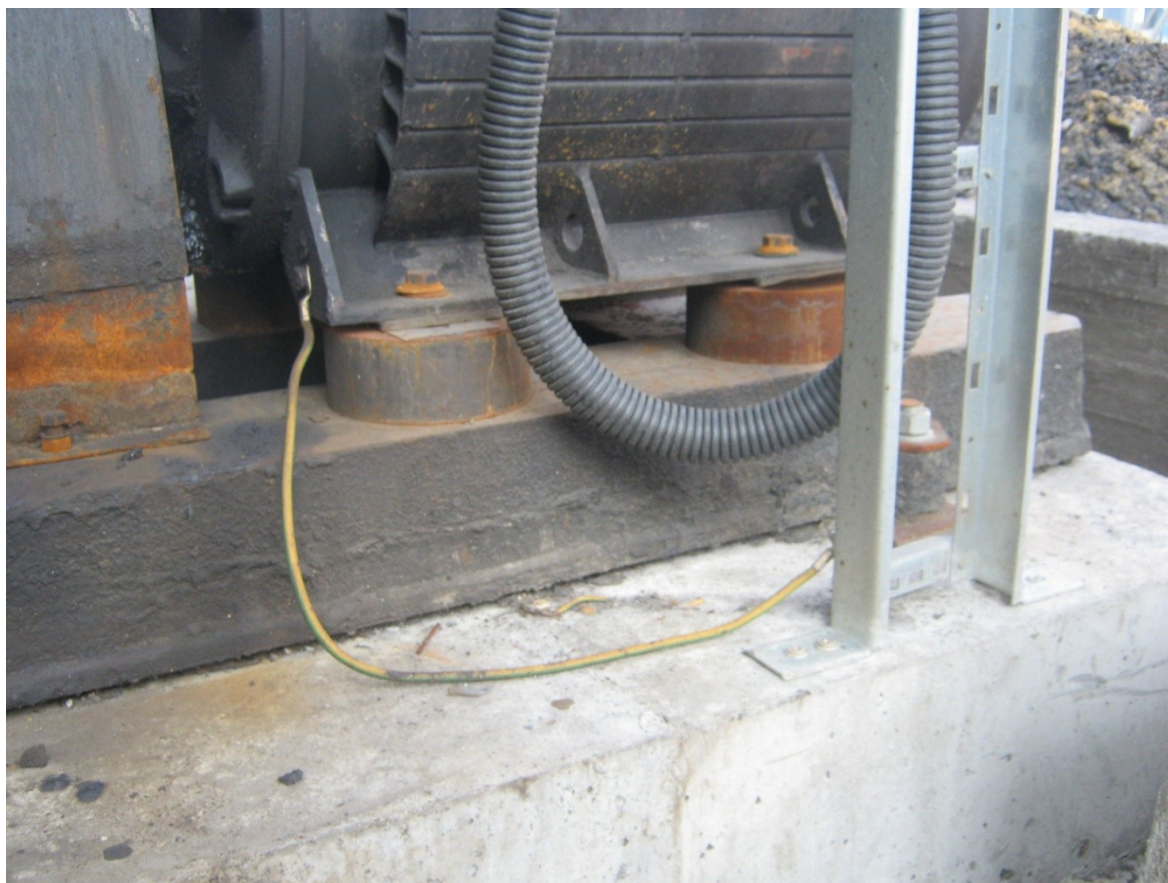
Obr. 3.27 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č1. v místě L1-H (horizontální směr) 7.3 2013





Obr. 3.28 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č1.  
v místě L3-H (horizontální směr) 7.3 2013





*Obr. 3.30 Pohled na vypodložení elektromotoru po opravě soustrojí*



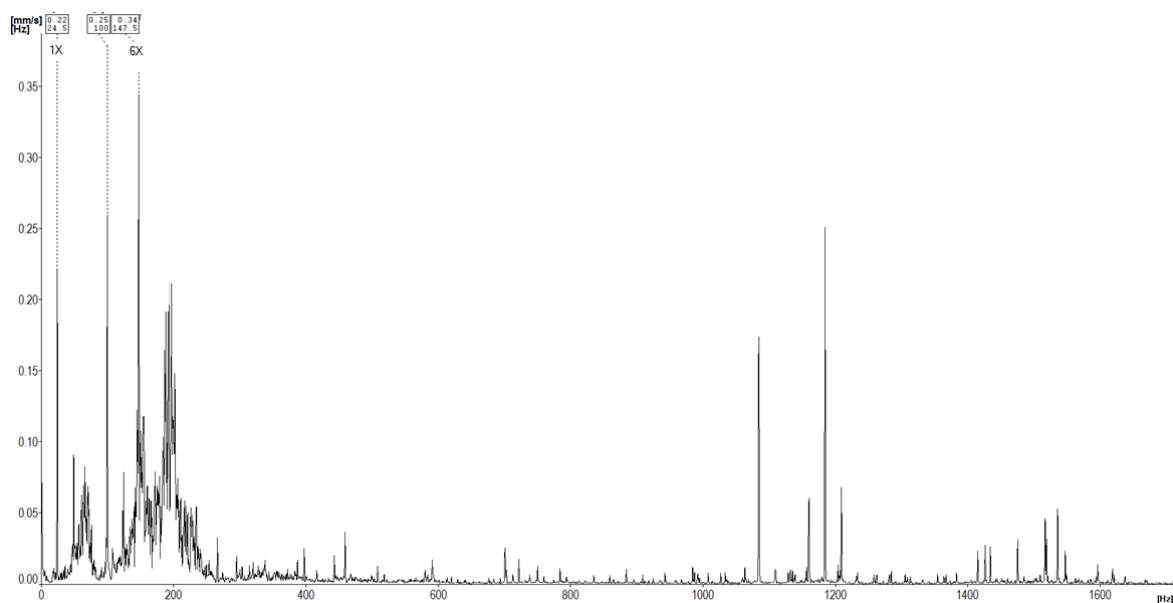
*Obr. 3.31 Pohled na připevnění frémy k novému betonovému základu*



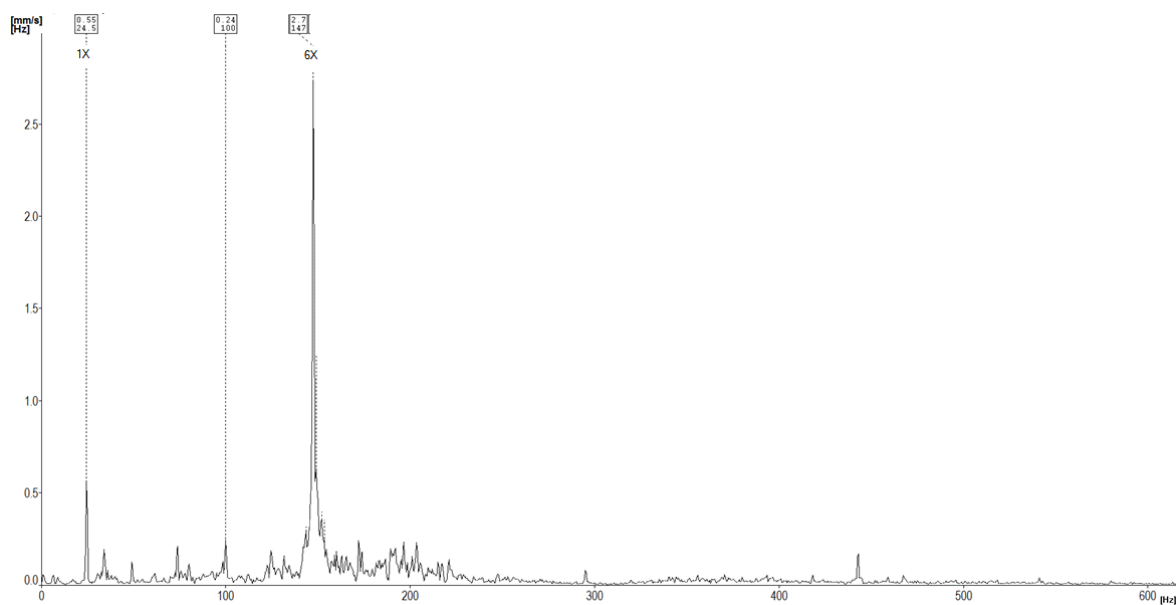
*Obr. 3.32 Vyměněná spojka u čerpacího soustrojí Č1*

### **Frekvenční spektra čerpacího soustrojí Č.2**

U čerpacího soustrojí Č.2 byly provedeny stejné opravy jako u soustrojí Č.1. V naměřených frekvenčních spektrech rychlosti vibrací jsou zaznamenány nízké špičky vibrací na první otáčkové frekvenci hřídele motoru (24,5 Hz) a také na harmonických násobcích této frekvence. Tyto špičky jsou však zatím malé a nepředstavují pro soustrojí žádné problémy. Na 6-ti násobku první otáčkové frekvence hřídele (147 Hz) v místě L3 se vyskytují zvýšené amplitudy rychlosti vibrací, tyto zvýšené amplitudy jsou způsobené problémy se spojkou. Při opravě soustrojí byla použita starší spojka a její opotřebení se projevuje ve frekvenčním spektru vibrací. Na rozdíl od opraveného soustrojí Č.1, se u tohoto soustrojí ve frekvenčních spektrech nevyskytují zvýšené amplitudy vibrací na poruchových frekvencích ložisek.

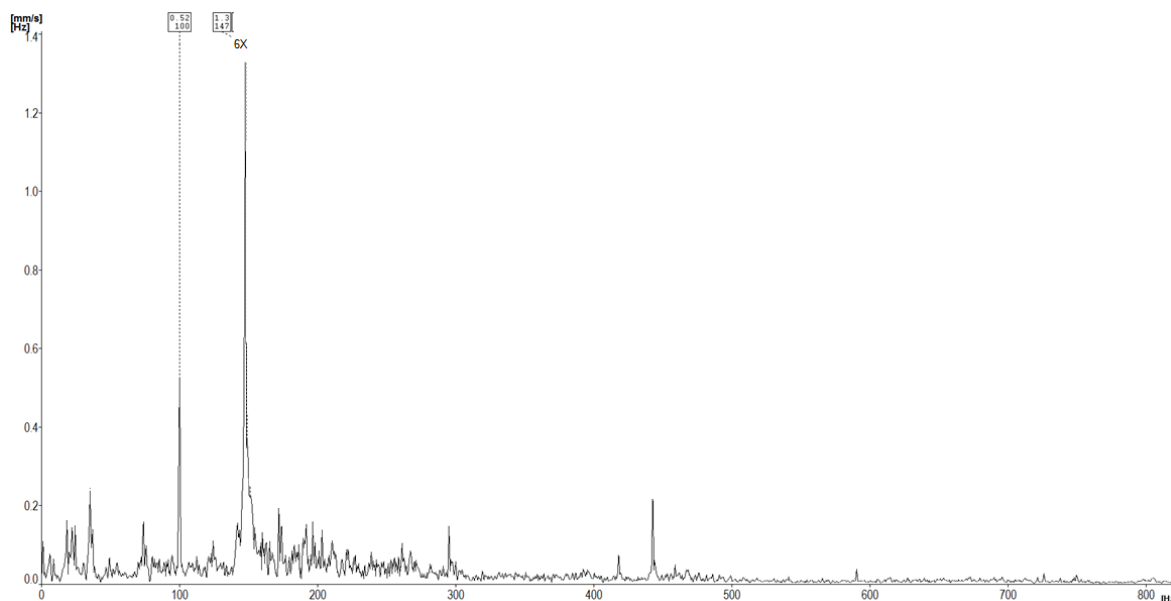


*Obr. 3.33 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č2. v místě L2-H  
(horizontální směr) 23.4 2013*



*Obr. 3.34 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č2. v místě L3-H  
(horizontální směr) 23.4.2013*

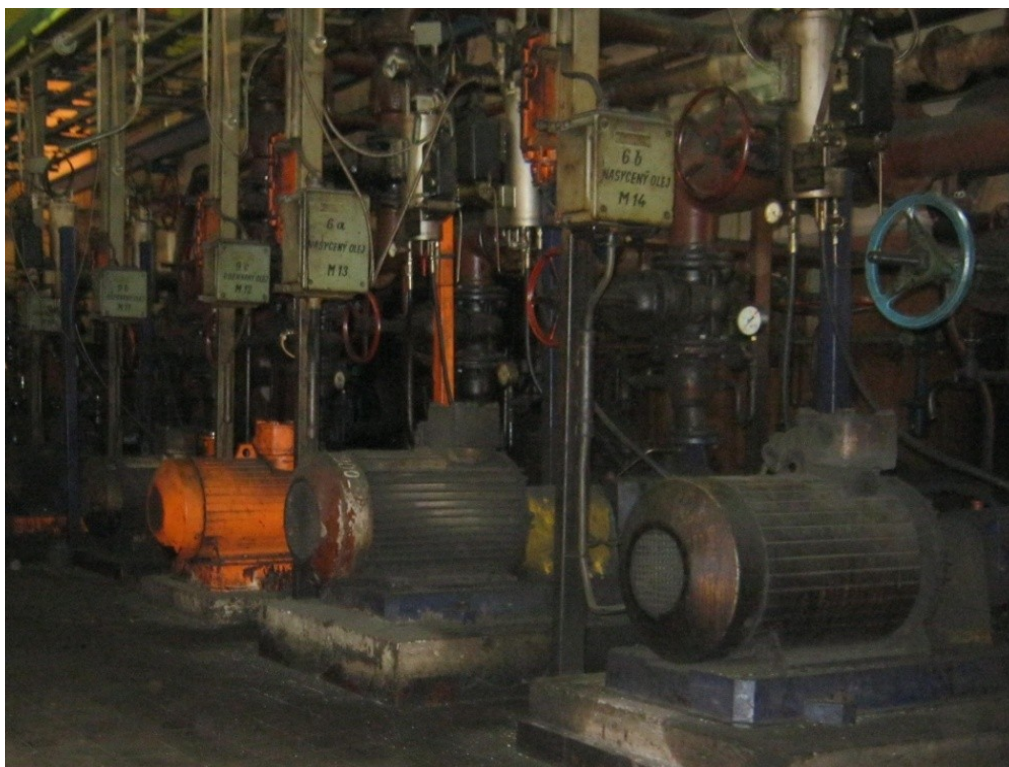




*Obr. 3.35 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čerpacího soustrojí Č2. v místě L3-A  
(axiální směr) 23.4 2013*

### 3.6 Diagnostika horizontálních čerpadel umístěných v hale

Horizontální čerpadla, která jsou umístěná v hale (tzv. benzolce) se využívají při separování benzolu z koksárenského plynu. Separace benzolu z koksárenského plynu je prováděna propíráním koksárenského plynu přes olej. Za pomoci destilace je poté benzol oddělován od oleje. Diagnostikovaná čerpadla se starají o dopravu oleje v tomto technologickém procesu a jsou rozdělena do několika skupin, z nichž každá skupina má za úkol dopravu jiného druhu oleje. Všechny tyto skupiny obsahují několik čerpadel, z nichž je vždy spuštěno jen jedno. Zbylá čerpadla slouží jako rezervní. Provoz těchto čerpadel je pravidelně střídán. V našem měření byla diagnostikována čerpadla ze skupiny 6, 7, 9.



Obr. 3.36 Čerpadla v hale

Tab 3.2 Parametry elektromotorů u čerpacího soustrojí 7b, 7c, 9a, 6b

Výrobce	MEZ Frenštát pod Radhoštěm
Typ	Asynchronní 3 ~
Výkon	30 kW
Otáčky	$2950 \text{ min}^{-1}$
Frekvence	50Hz
Otáčková frekvence	49,5Hz

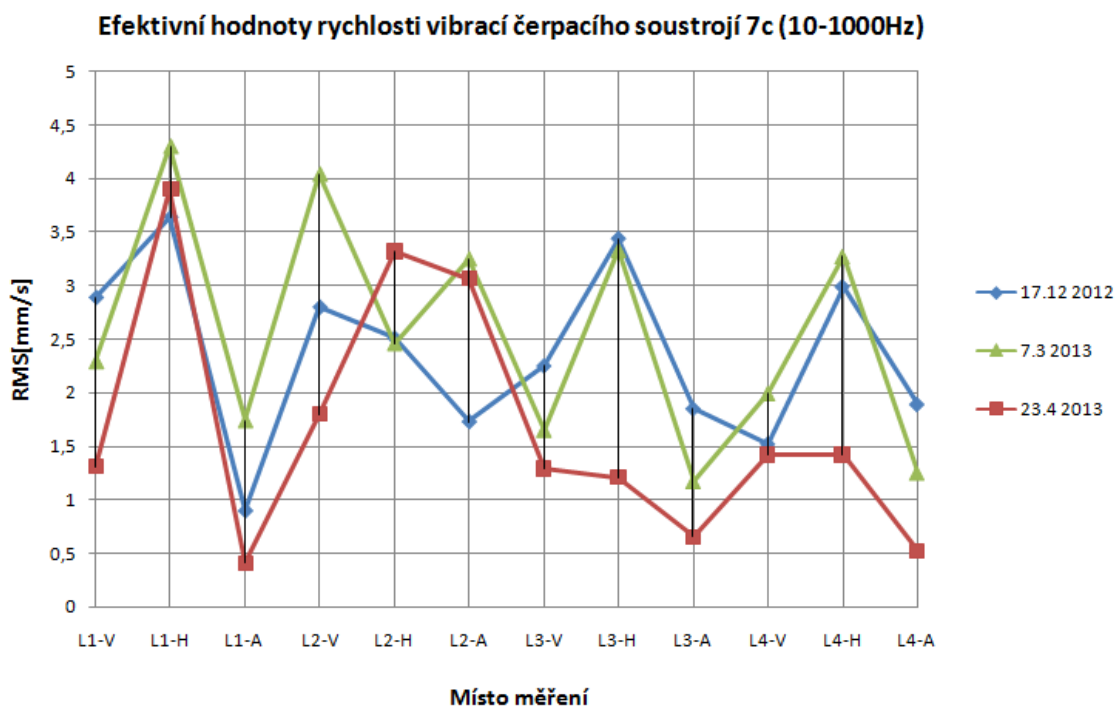
## Čerpací soustrojí 7c



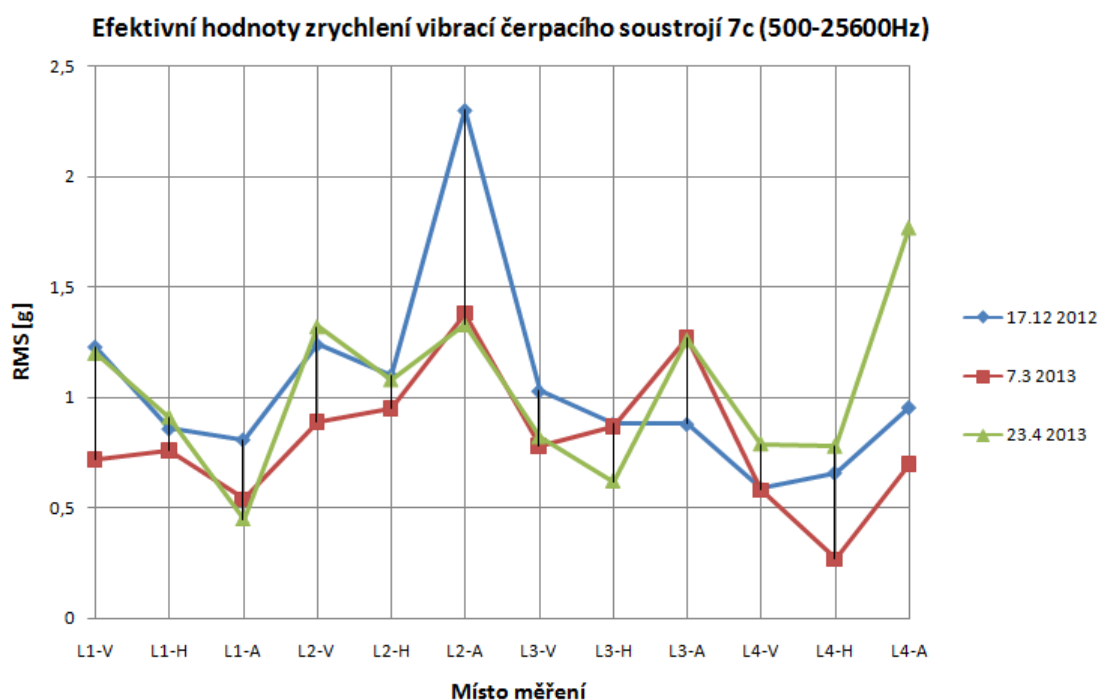
*Obr. 3.37 Čerpací soustrojí 7c*

### Vyhodnocení mohutnosti vibrací čerpacího soustrojí 7c

U čerpacího soustrojí 7c byla největší efektivní hodnota rychlosti vibrací naměřena na elektromotoru v místě L1-H a na čerpadle v místě L3-H. V měřicím místě L1-H byla naměřena hodnota 4,3 mm/s. Vyhodnocením podle normy ČSN ISO 10816-3 jsme zjistili, že pohon soustrojí spadá do pásma C. Stroje nacházející se v pásmu C, mají omezenou životnost. Na čerpadle byla v místě L3-H naměřena hodnota 3,44 mm/s. Tato naměřená hodnota patří dle normy ČSN ISO 10816-7 do pásma B - pásmo pro stroje s neomezeně dlouhým provozem.



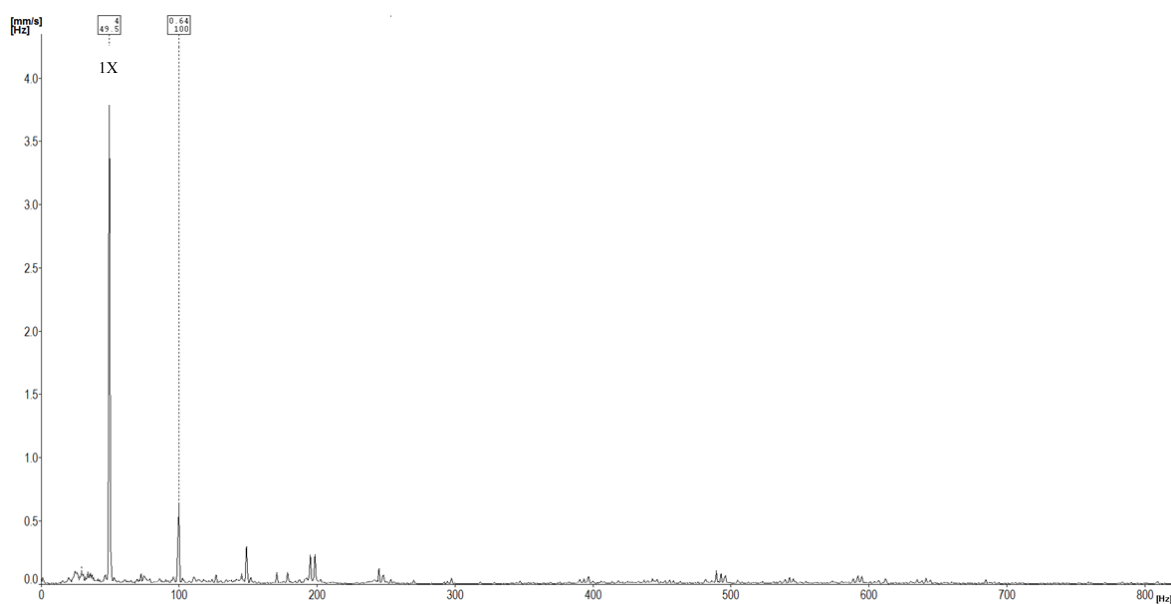
Obr. 3.38 Vývoj efektivních hodnot rychlosti vibrací u soustrojí 7c



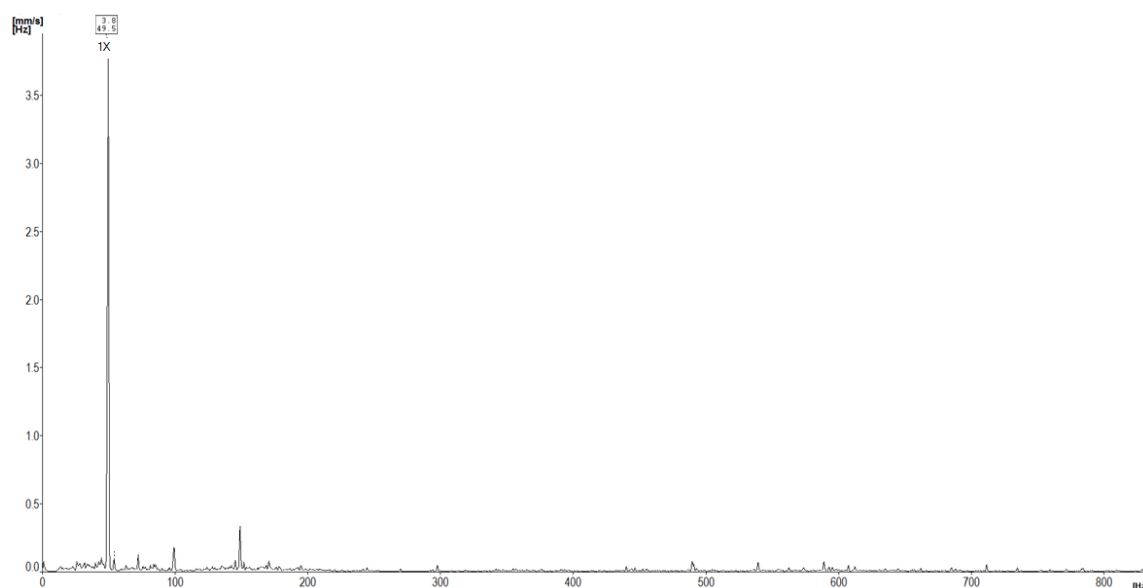
Obr. 3.39 Vývoj efektivních hodnot zrychlení vibrací u soustrojí 7c

V grafu naměřených efektivních hodnot zrychlení vibrací v pásmu (500-25600 Hz) se vyskytují zvýšené hodnoty zrychlení vibrací. Tyto zvýšené hodnoty upozorňují na zhoršený stav ložisek. Nevyšší hodnoty efektivního zrychlení vibrací se objevují na ložiskách L1 a L2, což jsou ložiska poblíž spojky. Nárůst efektivních hodnot zrychlení vibrací na těchto ložiscích je zapříčiněn horším stavem spojky.



**Vyhodnocení naměřených frekvenčních spekter rychlosti vibrací:**

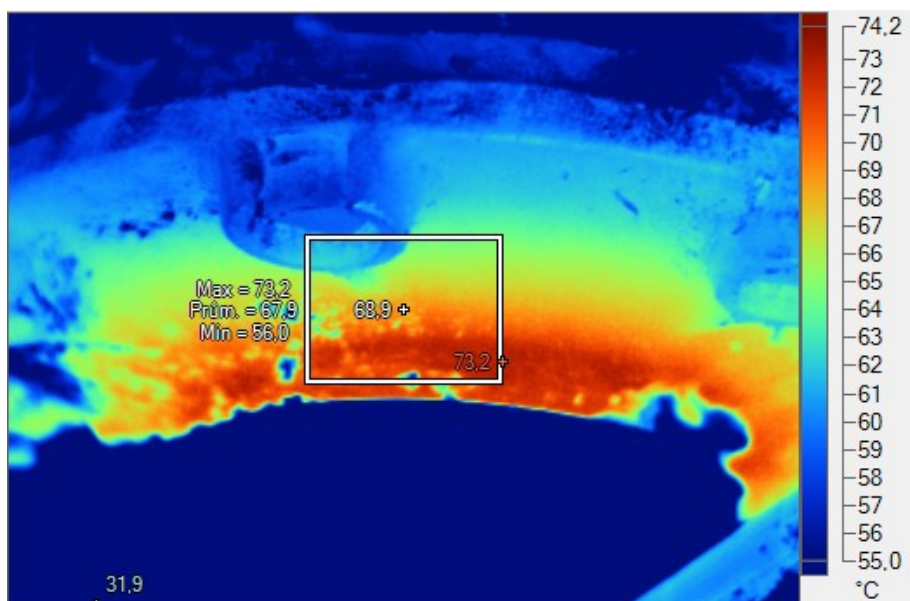
*Obr. 3.40 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací soustrojí 7c v místě L1-H  
(horizontální směr) 7.3 2013*



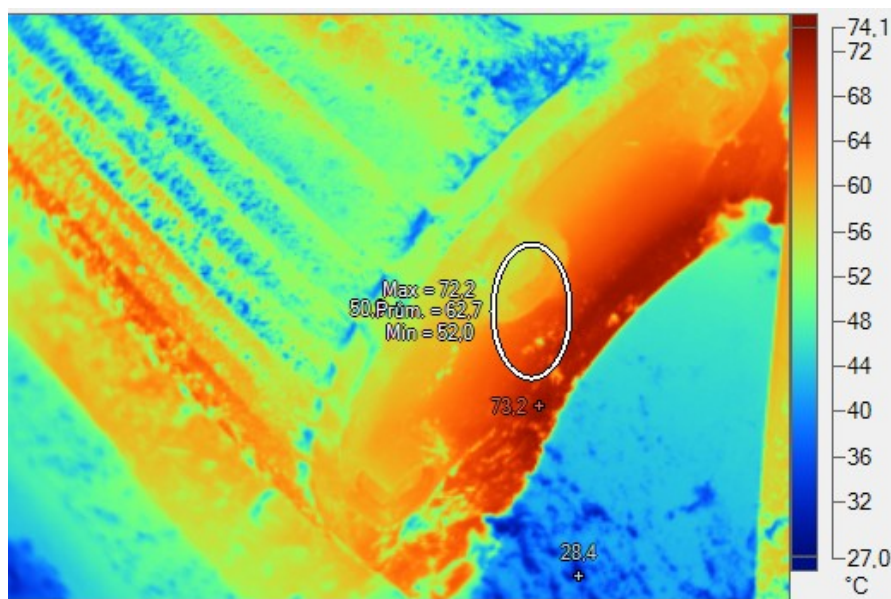
*Obr. 3.41 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací soustrojí 7c v místě L2-V  
(vertikální směr) 7.3 2013*

Ve frekvenčních spektrech rychlosti vibrací ložisek elektromotoru v měřicích místech L1-H a L2-V se vyskytují na první otáčkové frekvenci motoru (49,5 Hz) vyšší amplitudy rychlosti vibrací. Tyto projevené příznaky odpovídají menší nevyváženosti. Ve spektru L1-V se také vyskytuje amplituda vibrací na dvojnásobku síťové frekvence (100 Hz),

což ukazuje na problémy s nesymetrií elektromagnetického pole. Tato amplituda rychlosti vibrací je prozatím velmi malá a nepředstavuje pro elektromotor žádné nebezpečí.



Obr. 3.42 Detailní termosnímek ložiskového štítu motoru 7c od spojky



Obr. 3.43 Teplota ložiskového štítu motoru 7c od spojky

Použitím termovize jsme u čerpacího soustrojí odhalili zvýšenou teplotu na ložiskovém štítu elektromotoru. Nejvyšší naměřená teplota na ložiskovém štítě byla 73,2 °C. Oproti jiným čerpadlům se stejnými výkonnostními parametry byla teplota tohoto místa asi o 20 °C vyšší. Jelikož se ve frekvenčních spektrech vibrací nevyskytují problémy, které by mohly tento teplotní nárůst zapříčinit, tak můžeme usuzovat, že přehřívání ložiska je zapříčiněno jeho přemazáním.

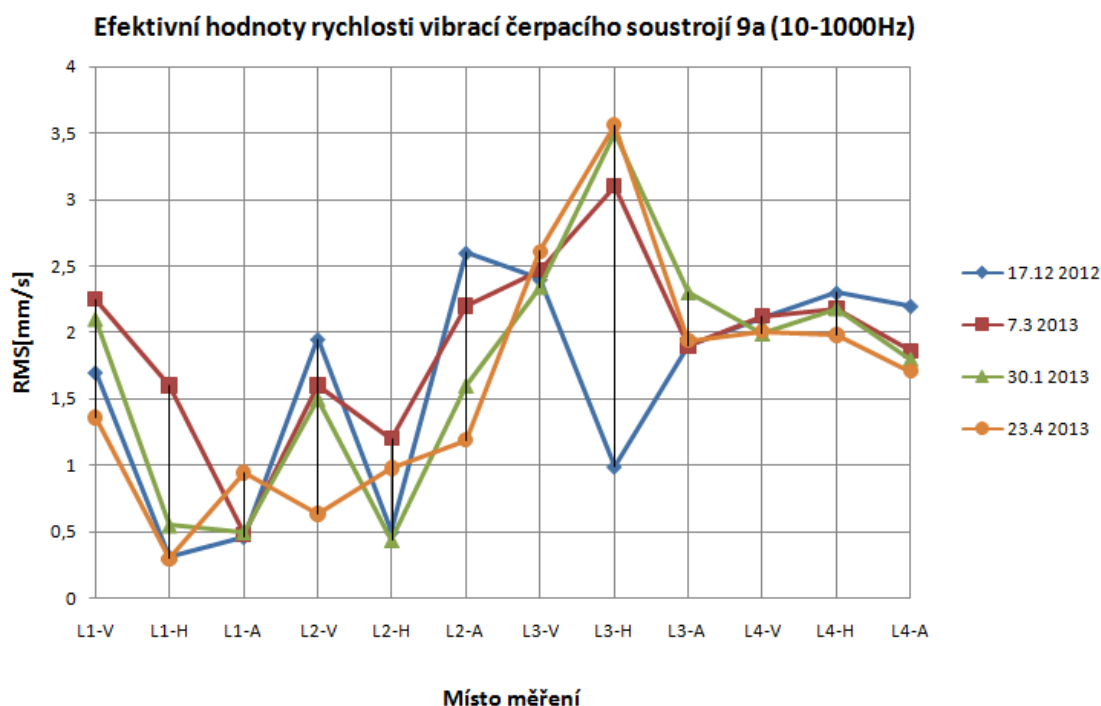
## Čerpací soustrojí 9a



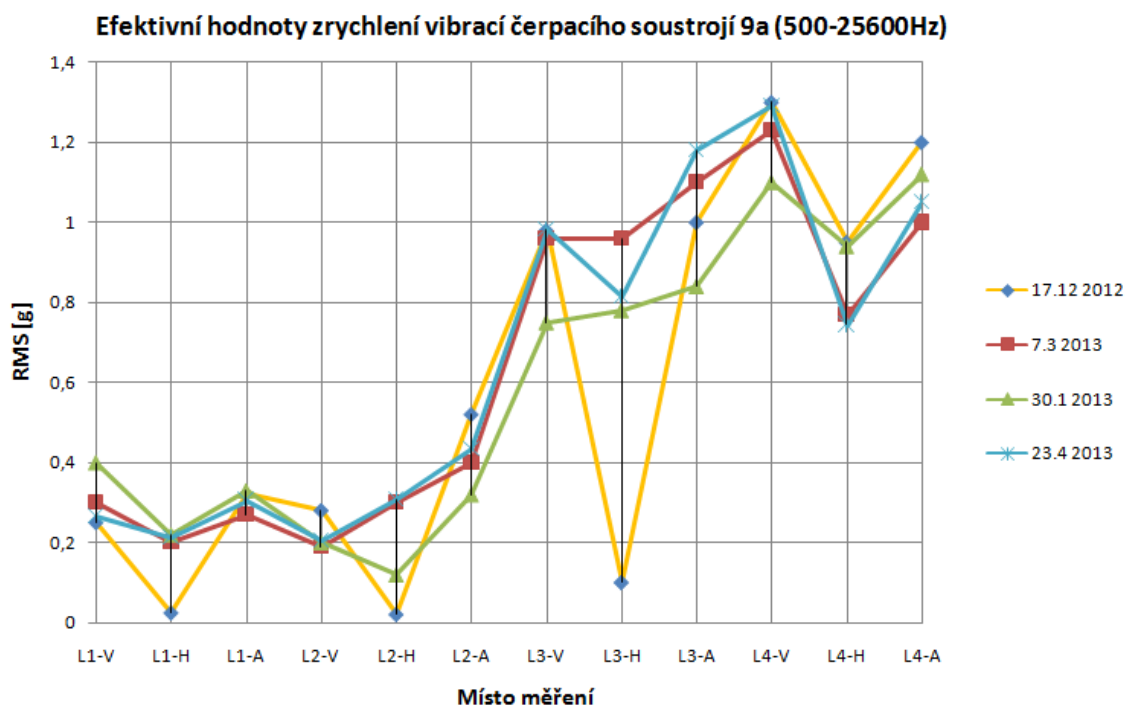
*Obr. 3.44 Čerpací soustrojí 9a*

### Vyhodnocení mohutnosti vibrací čerpacího soustrojí 9a

Na čerpacím soustrojí 9a byla nejvyšší efektivní hodnota rychlosti vibrací diagnostikována na elektromotoru v měřicím bodě L1-V a na čerpadle v měřicím bodě L3-H. Na elektromotoru v bodě L1-V byla naměřena hodnota 2,26 mm/s. Vyhodnocením dle normy ČSN ISO 10816 - 3 jsme zjistili, že tento stroj patří do pásma B. To je pásmo pro stroje, které mají neomezeně dlouhý provoz. Na čerpadle v místě L3-H byla neměřena hodnota 3,56 mm/s, což odpovídá dle normy ČSN ISO 10816-7 také pásmu B. Z vyhodnocení mohutnosti vibrací lze usuzovat, že čerpací soustrojí 9a je v dobrém technickém stavu.

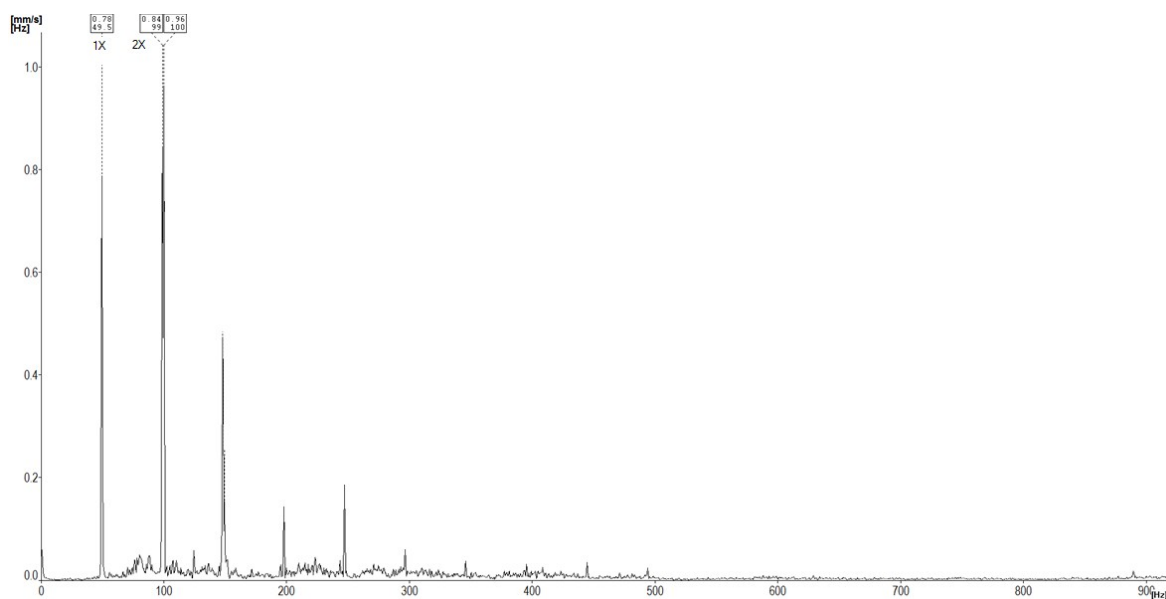


Obr. 3.45 Vývoj efektivních hodnot rychlosti vibrací u soustrojí 9a



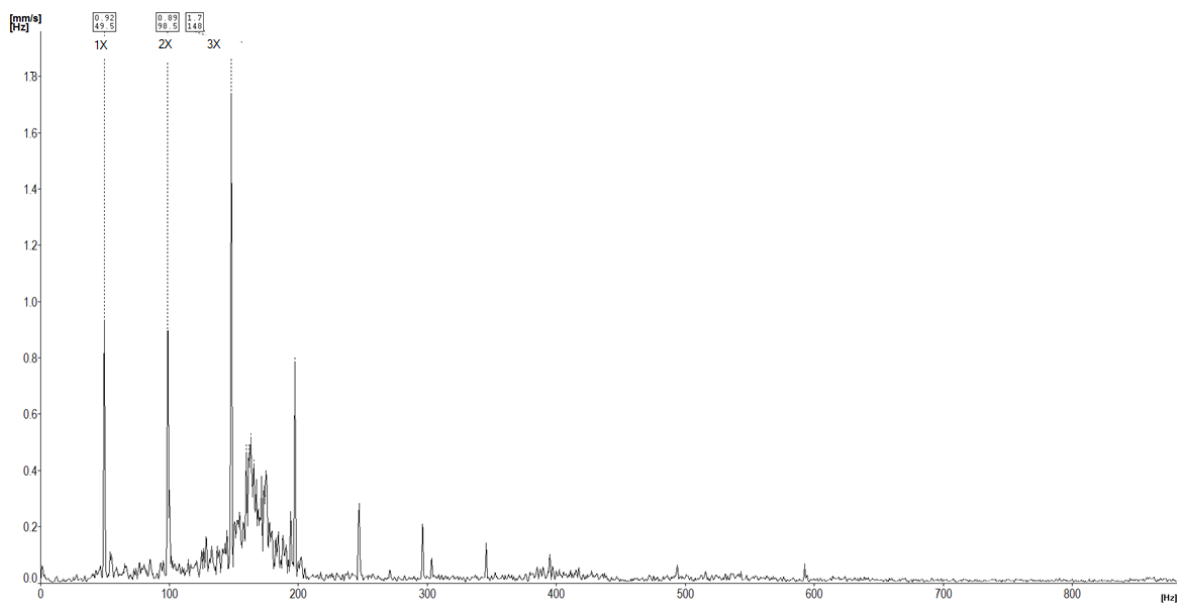
Obr. 3.46 Vývoj efektivních hodnot zrychlení vibrací u soustrojí 9a

Efektivní hodnoty zrychlení vibrací nabývají zvýšených hodnot na ložiskách umístěných v čerpadle. Přesto tyto zvýšené hodnoty zrychlení vibrací nepředstavují žádné větší riziko poruchy ložisek, které by mohlo ohrozit chod stroje. U ložisek motoru jsou hodnoty zrychlení poměrně malé. Můžeme tedy usuzovat, že ložiska jsou v dobrém technickém stavu.

**Vyhodnocení naměřených frekvenčních spekter rychlosti vibrací:**

*Obr. 3.47 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací soustrojí 9a v místě L1-V (vertikální směr)*

7.3 2013



*Obr. 3.48 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací soustrojí 9a v místě L3-H*

*(horizontální směr) 7.3 2013*

U tohoto čerpacího soustrojí se ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací objevuje první otáčková frekvence rotoru elektromotoru (49,5 Hz) a její harmonické násobky (2x, 3x, 4x). Menší amplitudy na těchto frekvencích upozorňují na mechanické uvolnění, což se později potvrdilo nalezením povolených kotvicích šroubů frémy k betonovému základu.



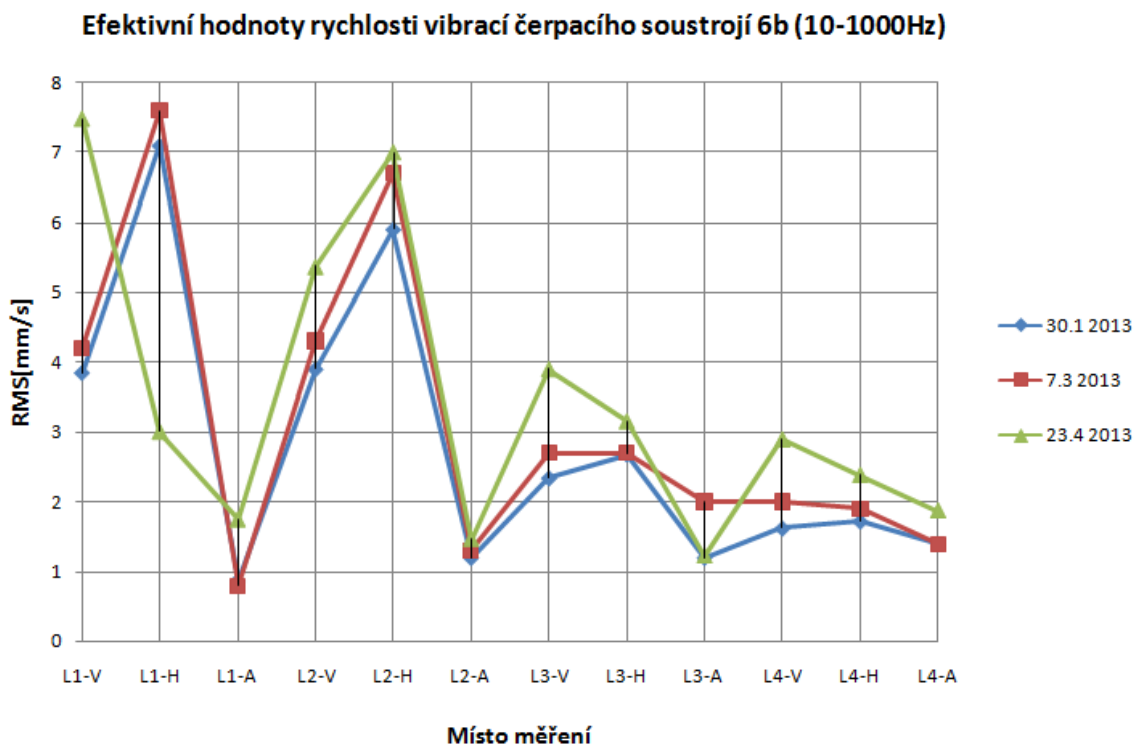
## Čerpací soustrojí 6b



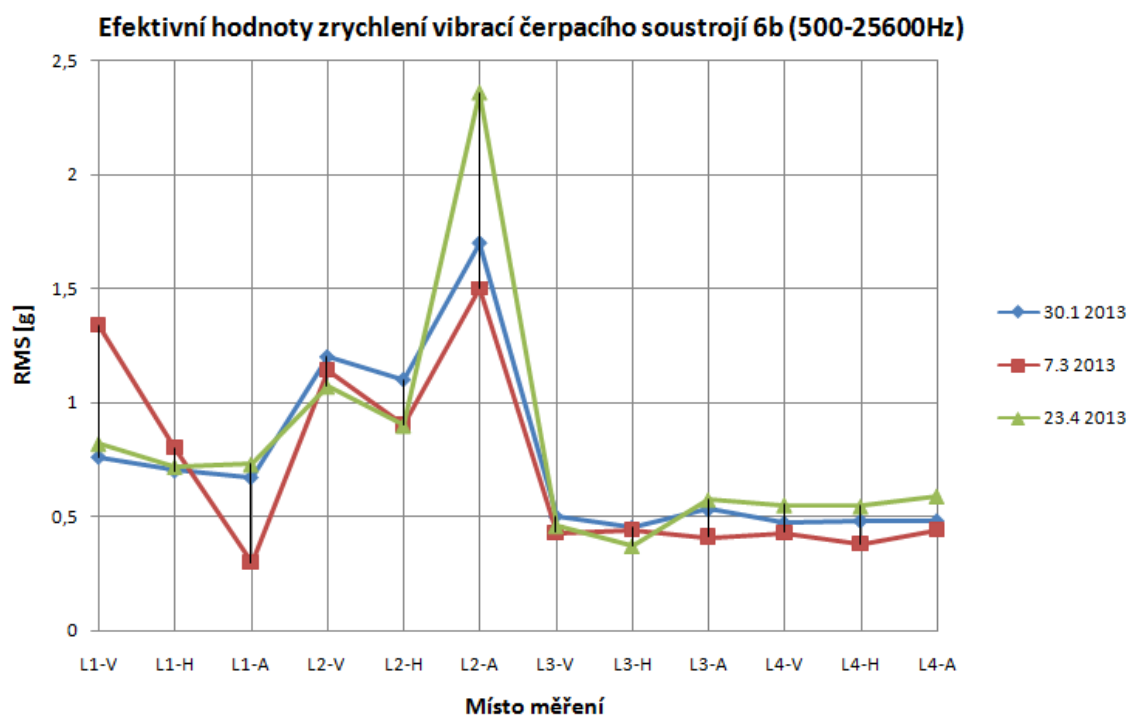
*Obr. 3.49 Čerpací soustrojí 6b*

### Vyhodnocení mohutnosti vibrací čerpacího soustrojí 6b

Největší efektivní hodnota rychlosti vibrací byla naměřena na elektromotoru v měřicím místě L1-H a to 7,6 mm/s. Tato námi naměřená hodnota patří dle normy ČSN ISO 10816-3 do pásma D. To znamená, že u elektromotoru hrozí poškození vlivem velmi vysokých vibrací. U čerpadla jsme naměřili největší RMS v měřicím místě L3-V. Naměřená hodnota v tomto místě byly 3,9 mm/s. Čerpadlo teda dle normy ČSN ISO 10816-7 patří do pásma B - pásma pro stroje s neomezeně dlouhým provozem.

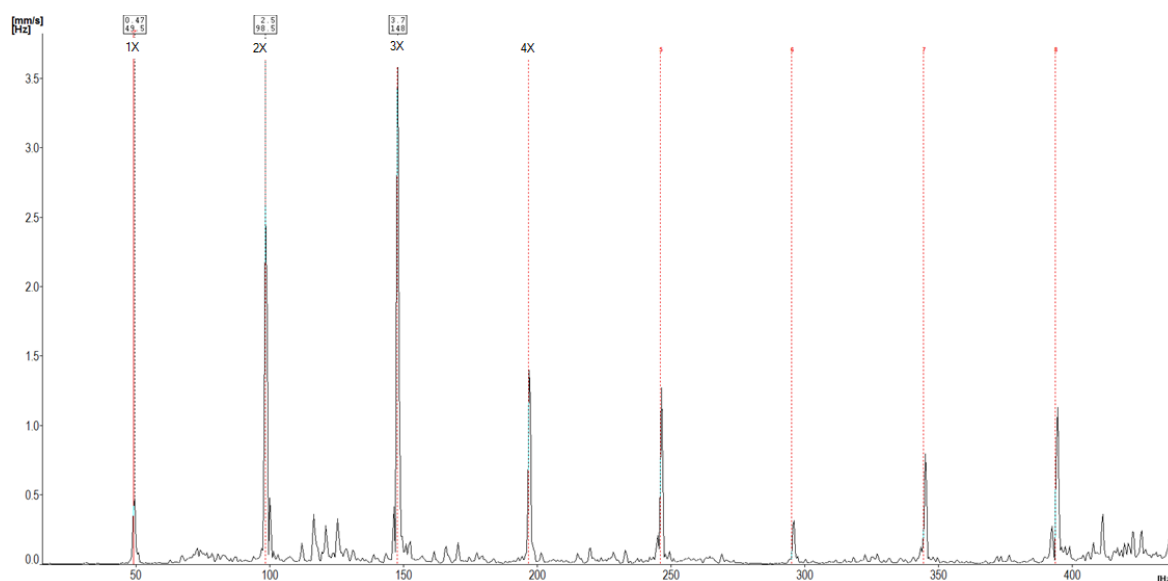


Obr. 3.50 Vývoj efektivních hodnot rychlosti vibrací u soustrojí 6b

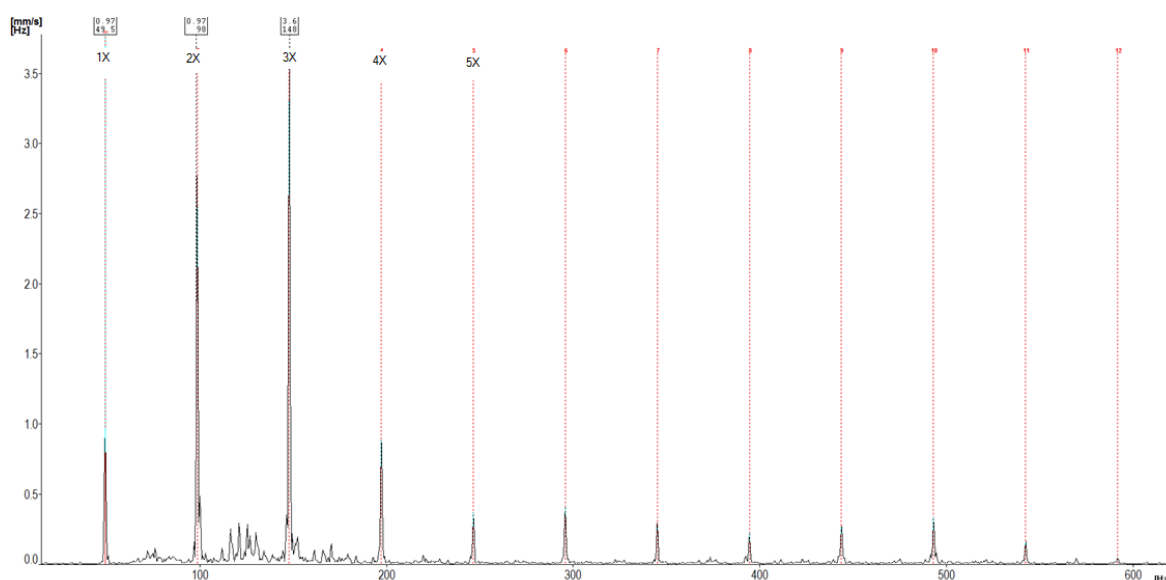


Obr. 3.51 Vývoj efektivních hodnot zrychlení vibrací u soustrojí 6b

U čerpacího soustrojí 6b byly zvýšené efektivní hodnoty zrychlení vibrací ve frekvenčním pásmu (500-25600Hz) naměřeny na ložisku L2. Nejvyšší hodnota byly u tohoto ložiska v axiálním směru (L2-A). Přestože jsou hodnoty zrychlení vibrací na elektromotoru vyšší než na čerpadle, je technický stav všech ložiska stále dobrý.

**Vyhodnocení naměřených frekvenčních spekter rychlosti vibrací:**

*Obr. 3.52 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací soustrojí 6b v místě L1-V (vertikální směr)*  
23.4 2013

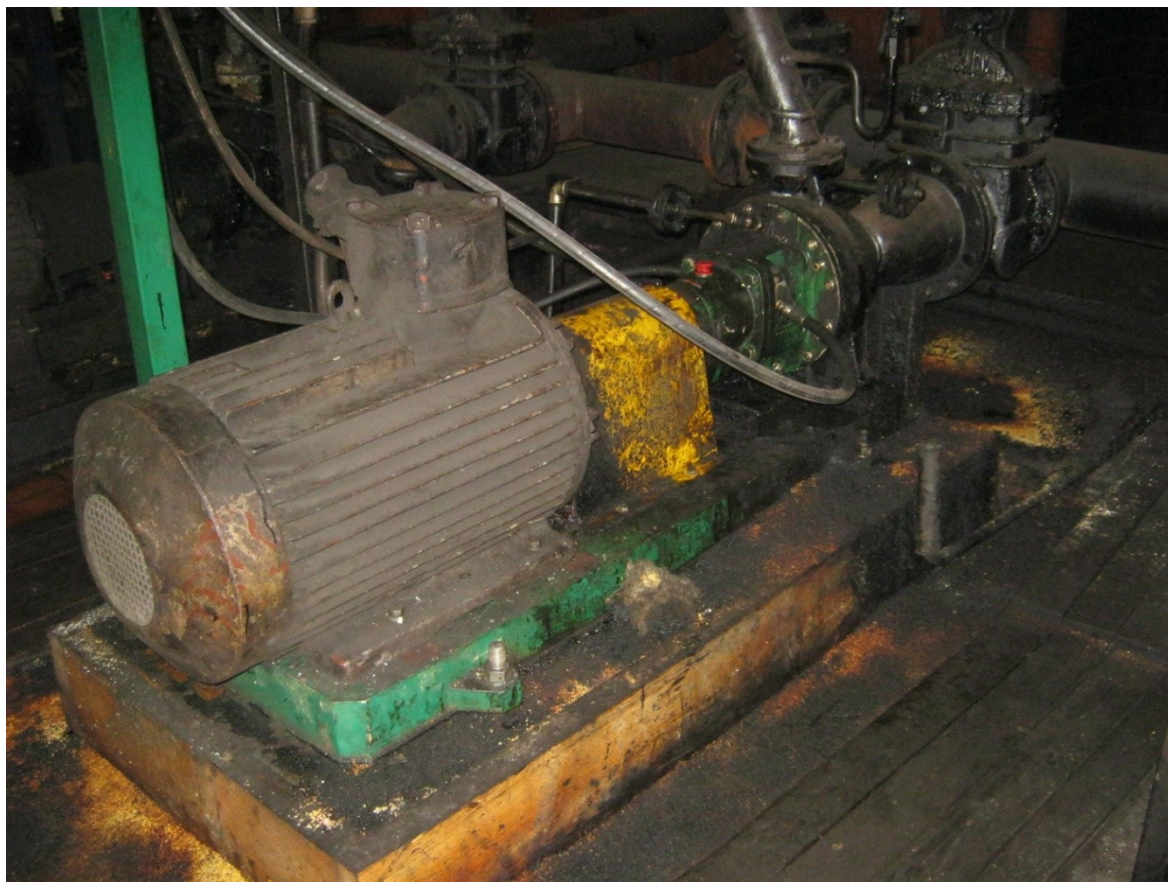


*Obr. 3.53 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací soustrojí 6b v místě L2-V (vertikální směr) 23.4 2013*

Ve frekvenčních spektrech rychlosti vibrací u elektromotoru se objevují vyšší amplitudy vibrací na první otáčkové frekvenci (49,5 Hz) a harmonických násobcích této frekvence. Zvýšené amplitudy rychlosti vibrací na zmiňovaných frekvencích znamenají, že u stroje se vyskytuje mechanické uvolnění. Po prozkoumání soustrojí jsme našli povolený kotvící šroub elektromotoru.

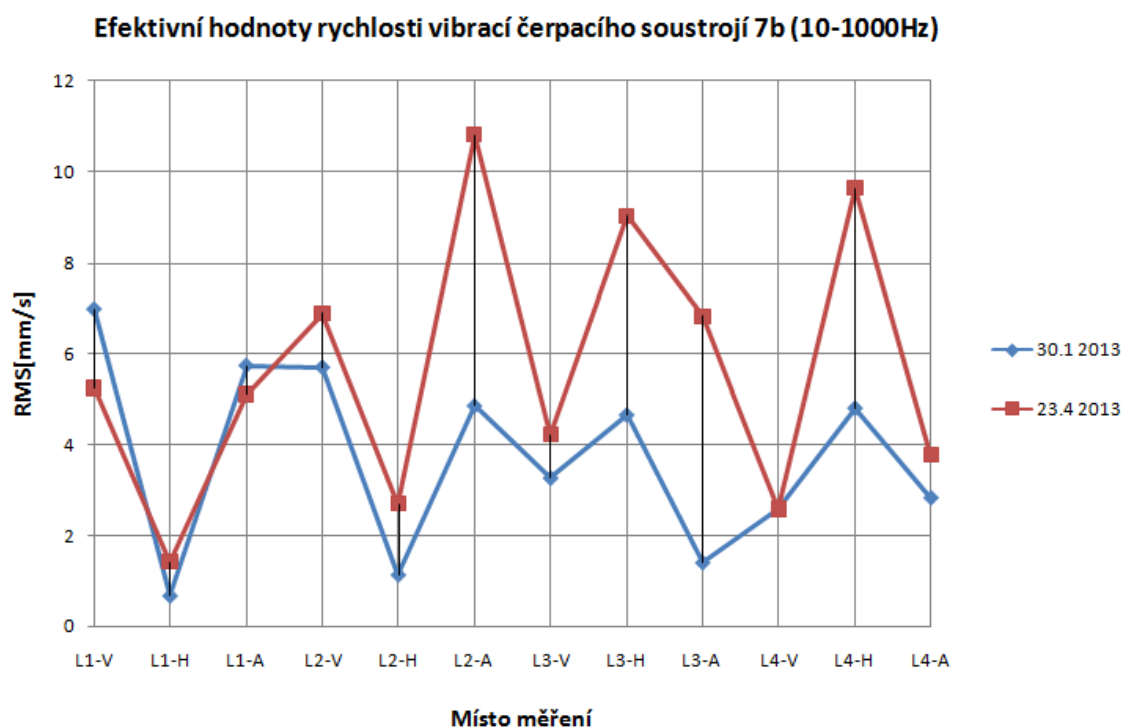


## Čerpací soustrojí 7b

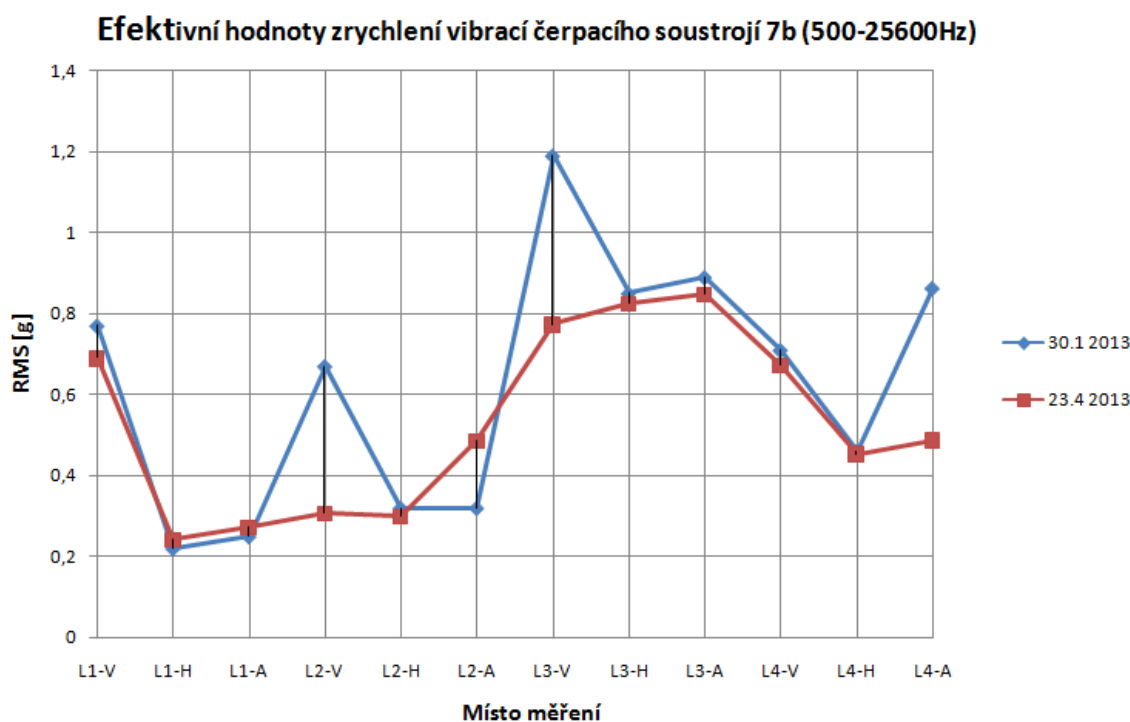


*Obr. 3.54 Čerpací soustrojí 7b*

Ze všech čerpacích soustrojí umístěných v hale jsme naměřili největší efektivní hodnoty rychlosti vibrací u čerpacího soustrojí 7b. U tohoto soustrojí byla největší efektivní hodnota zrychlení vibrací naměřena na motoru v bodě L2-A a to 10,8 mm/s. Dle normy ČSN ISO 10816-3 měřený objekt patří do pásma D. To znamená, že u tohoto stoje může nastat poškození zapříčiněné vysokými vibracemi. Na čerpadle byla nejvyšší efektivní hodnota rychlosti vibrací 9,8 mm/s naměřena v místě L4-H. Podle normy ČSN ISO 10816-7 čerpadlo také patří do pásma D. Jelikož byl elektromotor i čerpadlo dle normy ČSN ISO 10816 zařazen do pásma D, je nevhodné soustrojí dále provozovat, protože by mohlo dojít poškození soustrojí.



Obr. 3.55 Vývoj efektivních hodnot rychlosti vibrací u soustrojí 7b

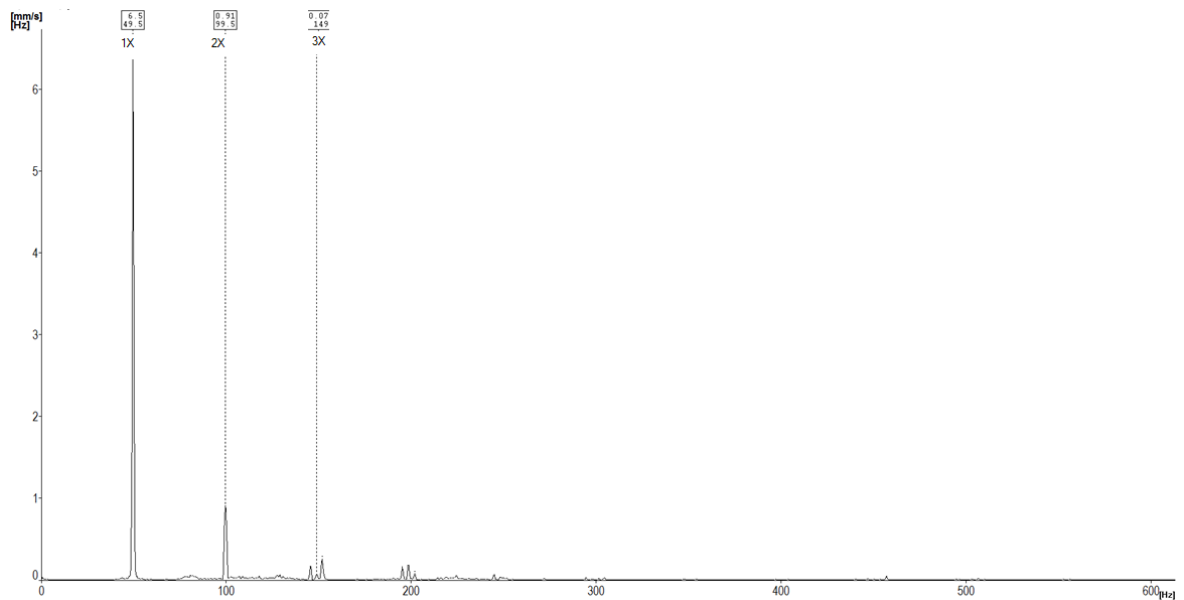


Obr. 3.56 Vývoj efektivních hodnot rychlosti vibrací u soustrojí 7b

Přestože u tohoto čerpacího soustrojí byly naměřeny nejvyšší efektivní hodnoty zrychlení vibrací ze všech diagnostikovaných soustrojí v hale, tak efektivní hodnoty zrychlení vibrací zůstaly u tohoto soustrojí nízké. To je způsobeno tím, že soustrojí bylo využíváno jen sporadicky a poruchy soustrojí se nemohly projevit na technickém stavu

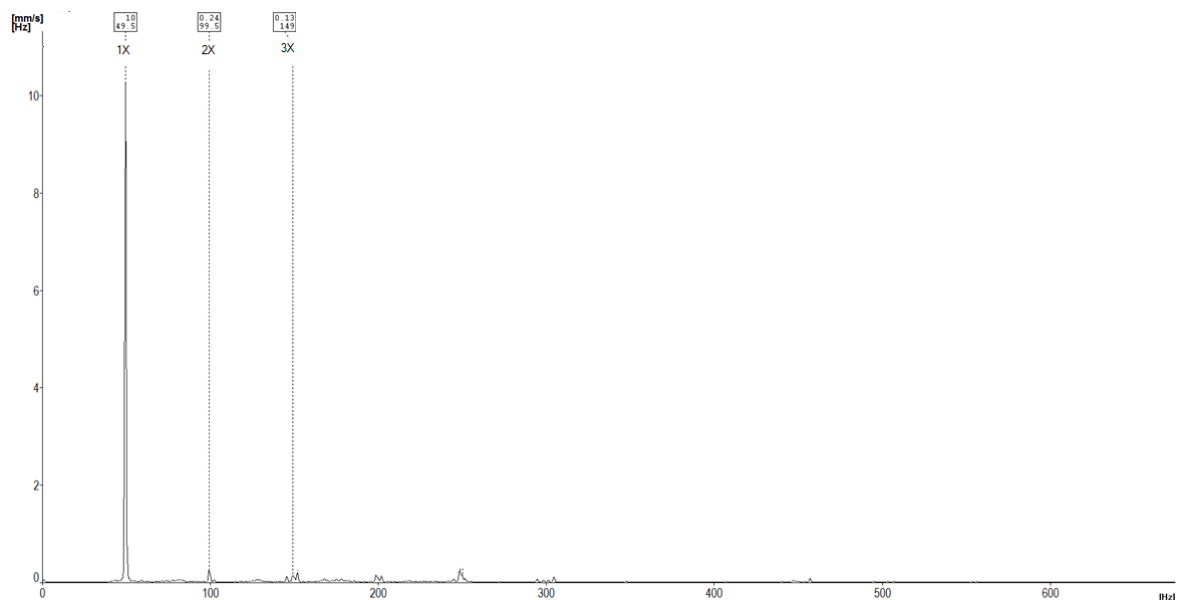
ložisek. V případě, že by bylo soustrojí s poruchami provozováno delší dobu, projevíly by se tyto závady v technickém stavu ložisek a to nárůstem efektivních hodnot zrychlení vibrací.

### Vyhodnocení naměřených frekvenčních spekter rychlosti vibrací:



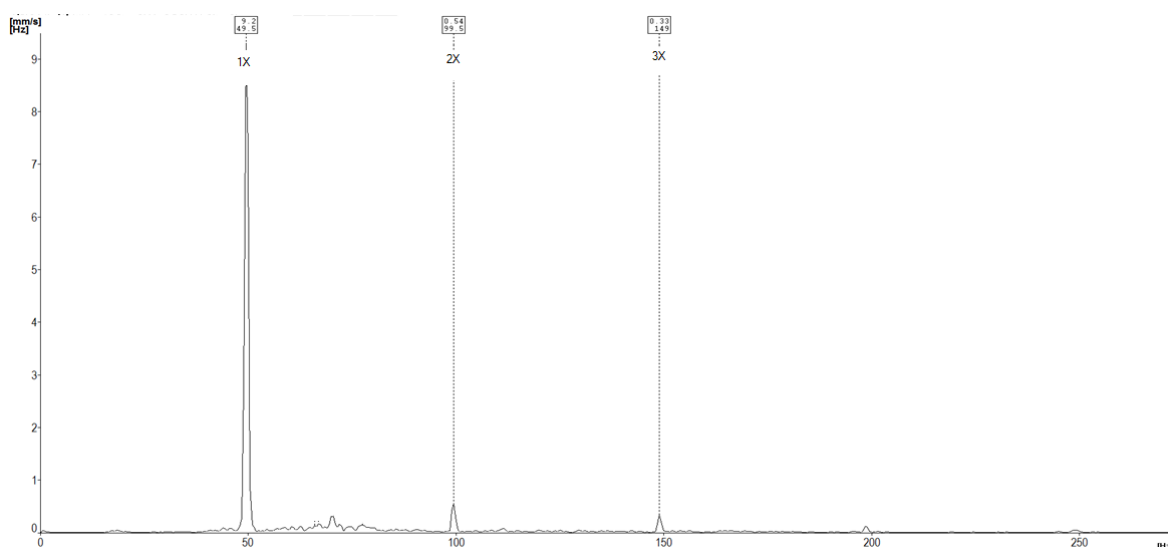
Obr. 3.57 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací soustrojí 7b v místě L2-V (vertikální směr)

23.4 2013



Obr. 3.58 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací soustrojí 7b v místě L2-A (axiální směr)

23.4 2013

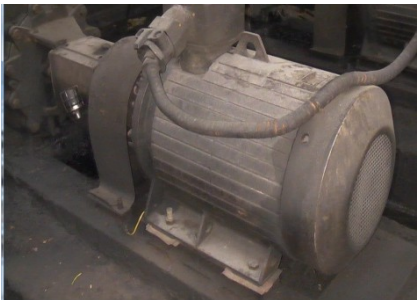


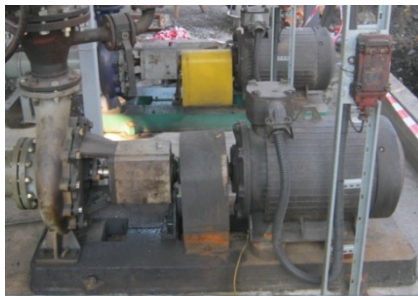

Obr. 3.59 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací soustrojí 7b v místě L4-H (horizontální směr) 23.4 2013

Ve všech frekvenčních spektrech rychlosti vibrací čerpacího soustrojí 7b se vždy objevují vysoké amplitudy vibrací na první otáčkové frekvenci rotoru motoru (49,5 Hz). Amplitudy rychlosti vibrací na harmonických násobcích otáčkové frekvence jsou v porovnání a amplitudou na frekvenci 1X zanedbatelné. Dle Berryho tabulek se takovými příznaky projevují nevyvážené stroje. Vysoké vibrace soustrojí jsou tedy způsobeny nevyvážeností rotující hřídele. Tato nevyváženost je s největší pravděpodobností způsobena nerovnoměrným usazením úsad na oběžném kole čerpadla.



### 3.7 Celkové zhodnocení technického stavu všech čerpacích soustrojí



Tab. 3.3 Technický stav čerpadel

Čerpací soustrojí Č.1 - před opravou			
Fotografie soustrojí	Mohutnost vibrací dle ČSN ISO 10816-3 a ČSN ISO 10816-7	Závada na soustrojí	Doporučení
	Elektromotor L2-V 28,2 mm/s Pásmo D	Popraskaný podkládající rám elektromotoru,	Soustrojí bylo odstaveno a provedena kompletní oprava soustrojí
	Čerpadlo L3-H 17 mm/s Pásmo D	Zhoršený stav spojky.  Špatné ustavení soustrojí.	

Čerpací soustrojí Č.1 - po opravě			
Fotografie soustrojí	Mohutnost vibrací dle ČSN ISO 10816-3 a ČSN ISO 10816-7	Závada na soustrojí	Doporučení
	Elektromotor: L2-A 4,3 mm/s Pásmo C	Povolené matice na kotvicích šroubech frémy. Špatný stav ložisek.	Použít pružné podložky a samozajišťo- vací matice.
	Čerpadlo: L3-H 8,7 mm/s Pásmo D		Vyměnit ložiska v celém soustrojí
Čerpací soustrojí Č.2			
Fotografie soustrojí	Mohutnost vibrací dle ČSN ISO 10816-3 a ČSN ISO 10816-7	Závada na soustrojí	Doporučení
	Elektromotor: L1-V 1,2 mm/s Pásmo A	Poškozená spojka	Výměna spojky
	Čerpadlo: L3-H 3 mm/s Pásmo B		



Čerpací soustrojí 7c			
Fotografie soustrojí	Mohutnost vibrací dle ČSN ISO 10816-3 a ČSN ISO 10816-7	Závada na soustrojí	Doporučení
	Elektromotor L1-H 4,3 mm/s Pásmo C	Vysoká teplota ložiska motoru od spojky.  Nevývaha	Nepřemazávat ložiska  Opravit soustrojí
	Čerpadlo L3-H 3,4 mm/s Pásmo B		
Čerpací soustrojí 9a			
Fotografie soustrojí	Mohutnost vibrací dle ČSN ISO 10816-3 a ČSN ISO 10816-7	Závada na soustrojí	Doporučení
	Elektromotor L1-V 2,26 mm/s Pásmo B	Povolené matice na kotvících šroubech frémy.	Dotáhnout matice, popřípadě opravit vytržené šrouby
	Čerpadlo L3-H 3,56 mm/s Pásmo B		

Čerpací soustrojí 6b			
Fotografie soustrojí	Mohutnost vibrací dle ČSN ISO 10816-3 a ČSN ISO 10816-7	Závada na soustrojí	Doporučení
	Elektromotor L1-H 7,6 mm/s Pásmo D	Povolený šroub na elektromotoru	Dotáhnout šroub
	Čerpadlo L3-V 3,9 mm/s Pásmo B		
Čerpací soustrojí 7b			
Fotografie soustrojí	Mohutnost vibrací dle ČSN ISO 10816-3 a ČSN ISO 10816-7	Závada na soustrojí	Doporučení
	Elektromotor L2-A 10,8 mm/s Pásmo D	Nevývaha	Okamžitě soustrojí odstavit a opravit
	Čerpadlo L3-H 9,8 mm/s Pásmo D		

## Závěr

Diplomová práce se zabývá využitím metod technické diagnostiky u čerpacích zařízení ve společnosti koksovna Svoboda v Ostravě Přívoze. K diagnostikování čerpacích soustrojí bylo využito metod termodiagnostiky a vibrodiagnostiky, což jsou bezdemontážní metody technické diagnostiky. Diagnostická měření na čerpacích soustrojích byla prováděna mobilním vibračním analyzátozem Adash VA4Pro a termokamerou Fluke Ti32. Diagnostickým měřením a následnou analýzou naměřených dat jsme u většiny čerpacích soustrojí v podniku odhalili blížící se poruchy. U čerpacího soustrojí Č.1, jsme při prvním měření (17.12 2012) naměřili velmi vysoké hodnoty vibrací. Tyto vysoké hodnoty vibrací byly způsobeny trhlinami v rámu, který sloužil k podložení elektromotoru. Při následujícím měření (30.1 2013) nastal u tohoto soustrojí výrazný pokles velikosti vibrací. Tento pokles vibrací byl zapříčiněn zavařením trhlín v podkládacím rámu elektromotoru. Při posledním měření (7.3 2013) bylo již soustrojí po celkové opravě a předpokládalo se, že po vybudování nového betonového základu, výměně spojky, ustavení a nahrazení problematického ocelového podkládacího rámu plnými ocelovými profily o vyšší tuhosti bude čerpací zařízení již zcela v pořádku a vibrace budou velmi malé. Po proměření soustrojí jsme ale zjistili, že naměřené hodnoty vibrací jsou v některých měřících místech stále poměrně vysoké a skutečný technický stav soustrojí neodpovídá technickému stavu nově opraveného stroje. Tento zhoršený technický stav byl zapříčiněn nesprávným ukotvením frémy k betonovému základu. Jelikož byla fréma ve čtyřech místech podložena ocelovými podložkami, vznikla mezi frémou a betonovým základem vzduchová mezera. Tato mezera způsobila snížení tuhosti celé soustavy a nárůst vibrací. Pokud bychom chtěli dosáhnout co nejvyšší tuhosti soustavy, musela by být fréma zalita do betonu. U dalších čerpacích soustrojí v podniku byly nejčastěji diagnostikovány poruchy jako nevyvážení, problémy se spojkou, a povolené šrouby. Celkové zhodnocení technického stavu všech diagnostikovaných čerpadel v koksárenském podniku se nachází v tabulce 3.3.



## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat společnosti koksovna Svoboda za umožnění měření na horizontálních čerpadlech a zaměstnancům podniku za projevenou ochotu. Dále by jsem chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Jan Blata, Ph.D. za vstřícnost, trpělivost a cenné připomínky při vypracování diplomové práce.

Miroslav Botík

## Seznam použitých zdrojů

- [1] HÁJEK, Gustav. *Čerpadla*. Praha: SNTL, 1953.
- [2] KROUZA, Václav. *Čerpadla odstředivá a jim příbuzná*. Praha: Československá akademie věd, 1956.
- [3] BRADA, Karel; a Petr HLAVÍNEK. *Čerpadla ve vodním hospodářství*. Brno : NOEL 2000, 2004. ISBN 80-86020-43-6
- [4] BRADA, Karel; a Jaroslav BLÁHA. *Hydraulické stroje I: Čerpadla*. Praha: ČVUT, 1979
- [5] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 2.svazek*. Praha: Scientia, 1993.
- [6] BRADA, Karel; a Jaroslav BLÁHA. *Čerpací technika*. Praha: ČVUT, 1987.
- [7] ŠAFR, Emil. *Ložiska a jejich mazání*. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1951.
- [8] POŠTA, Josef, Petr VESELÝ a Milan DVOŘÁK. *Degradace strojních součástí*. Praha: ČZU, 2002. ISBN 80-213-0967-9
- [9] *Příručka SKF pro údržbu ložisek*. 1991.
- [10] HELEBRANT, František, Jan BLATA a Vlastimil MONI. *Studijní podklady termografie*. Ostrava: VŠB, 2010.
- [11] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory - metody - analýza signálu*. Praha: Technická literatura BEN, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [12] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost II: Vibrodiagnostika*. Ostrava: VŠB, 2004. ISBN 80-248-0605-9.
- [13] *Diagnostika valivých ložisek*. [Online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.adash.cz>.

[14] *Příručka SKF pro diagnostiku ložisek*. 1999.

[15] Koksovna Svoboda. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z:  
<http://www.koksovny.cz/cs/kde-vyrabime-koks/koksovna-svoboda>

[16] Reptek LLC. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z:  
[http://www.reptekco.com/products\\_Fluke\\_Celesco.html](http://www.reptekco.com/products_Fluke_Celesco.html)

[17] ČSN ISO 10816 – 3. *Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha: ČNI, 1999.

[18] ČSN ISO 10816 – 7. *Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha: ČNI, 1999